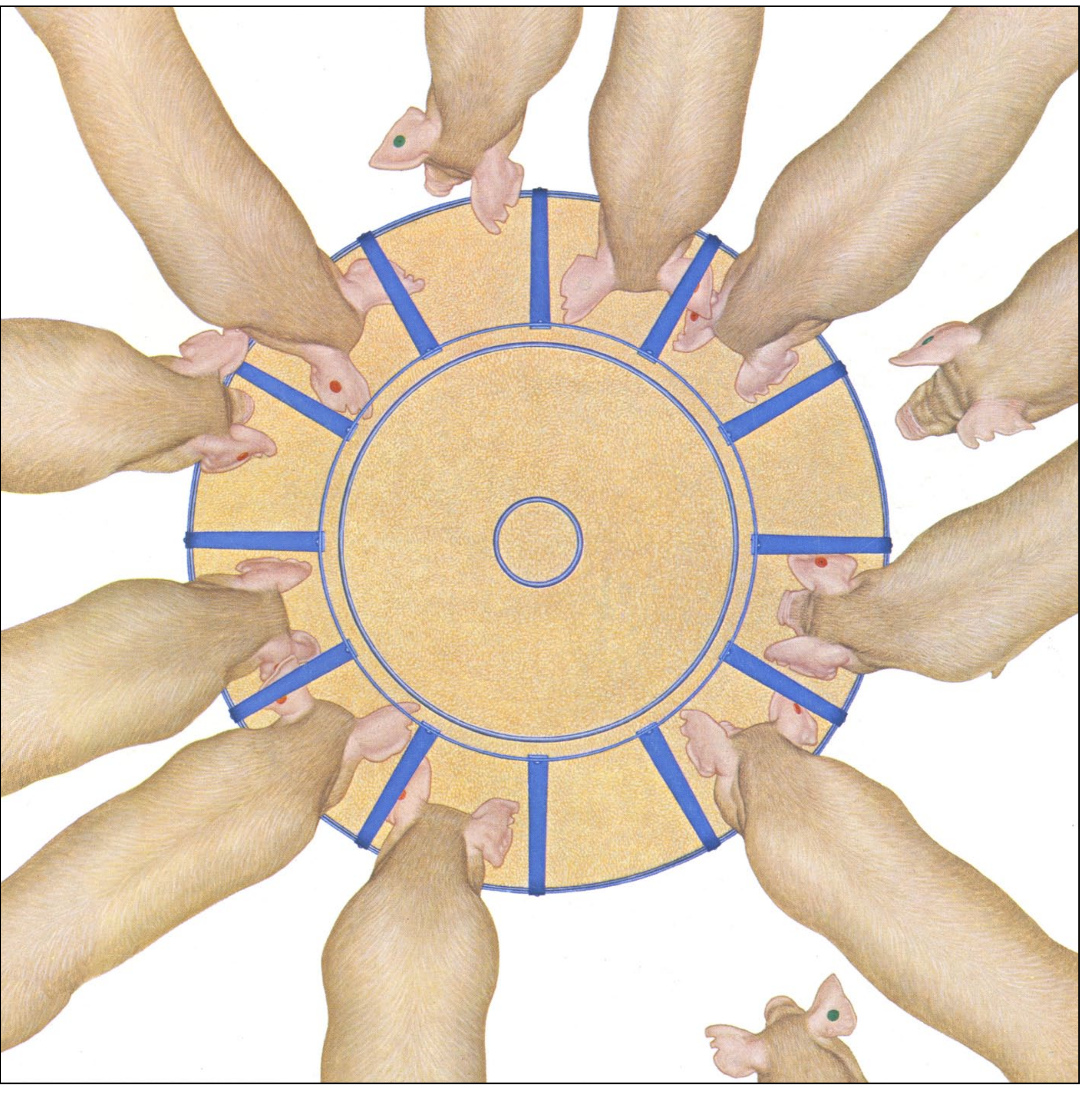
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



MEJORA PORCINA

Julio 1983

350 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 82
Julio 1983

INVESTIGACION Y
CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

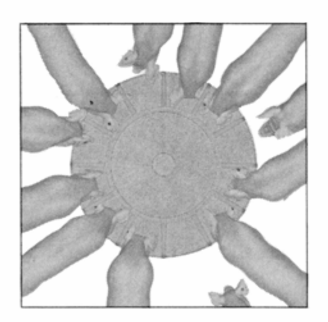
Guillermo Jenaro Garrido: *Armas inteligentes en la guerra naval*; Ramón Pascual: *Vibraciones del núcleo atómico*; Isabel García Acha y Julio Rodríguez Villanueva: *Microcuerpos celulares*; Jesús Ramírez de Lucas y Margaret McGinity: *Avances en la producción porcina*; R. L. Felip: *Nuevos materiales inorgánicos*; Luis Bou: *Métodos estadísticos intensivos por ordenador*; Francisco Navarro López: *Muerte súbita de origen cardíaco: un problema topológico*; Luis Bou: *Temas metamágicos*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Manuel Ballester y E. Julve

Libros:

Pedro Laín Entralgo, Miguel Ortuño, Javier Echevarría y Rosa Martínez



LA PORTADA

La pintura de la portada muestra un comedero rotativo para cerdos (véase "Avances en la producción porcina", por Wilson G. Pond, en este número). El comedero es de los usados en una "granja de acabados", aquella que compra cerdos de 13 a 23 kilogramos y los alimenta hasta alcanzar el peso de mercado de 100 kilogramos o más. El pienso es una mezcla de harinas de maíz y soja con suplementos de proteínas, minerales y vitaminas, determinados de forma que satisfagan las necesidades del animal. En esta granja los cerdos de un mismo peso se alimentan juntos, cualesquiera que sean sus edades. El pienso se distribuye a los comederos mediante una cinta elevada. Las muescas de las orejas indican el lugar de nacimiento del cerdo; el color de la marca circular señala la feria en que se compró. Existe fuerte tendencia en la moderna producción porcina a realizar operaciones "de parto a acabado", en las que el cerdo permanece en la misma granja desde que nace hasta que se envía al matadero para sacrificarlo.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 3.850 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 52 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
350 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
450 pesetas

Distribución para España
Distribuciones de Enlace, S. A.
Ausias March, 49 - Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - Madrid-30
Tel. 430 84 81
Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.° - Barcelona-34
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Marvin Mattelson

Página	Fuente
11	United Press International
12-15	Walken Graphics
16-17	General Dynamics Corporation
18-19	Los Alamos National Laboratory
21-32	Jerome Kuhl
35	Marten Veenhuis, Universidad holandesa de Groningen
36	Helen Shio, Universidad Rockefeller (*arriba*); Eldon H. Newcomb, Universidad de Wisconsin en Madison (*abajo*)
37	Eldon H. Newcomb, Universidad de Wisconsin en Madison
38-43	Alan D. Iselin
44	Helen Shio, Universidad Rockefeller
45	Pierre Baudhuin, Instituto Internacional de Patología Celular y Molecular
51-52	Tom Prentiss
53	Ilil Arbel
54-56	Tom Prentiss
57	Ilil Arbel
59	R. F. Bonifield
60-61	Phillip A. Harrington
62-66	Ilil Arbel
68	Phillip A. Harrington (*arriba*), Imperial Chemical Industries (*abajo*)
71-80	Allen Beechel
81-82	Ilil Arbel
85-86	C. Azcón G. de Aguilar, J.-M. Barea y J. Olivares
87-90	Ricardo Génova, C. Azcón G. de Aguilar, J.-M. Barea y J. Olivares
91	C. Azcón G. de Aguilar, J.-M. Barea y J. Olivares
92	Ricardo Génova, C. Azcón G. de Aguilar, J.-M. Barea y J. Olivares
93	C. Azcón G. de Aguilar, J.-M. Barea y J. Olivares
95-106	George V. Kelvin
109-110	Ilil Arbel
117	R. F. Bonifield
118-120	Michael Goodman
121	Jearl Walker

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - Barcelona-5
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S. A.
Napoles, 249 - Tel. 207 40 11
Barcelona-13
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

PAUL F. WALKER ("Armas inteligentes en la guerra naval") preside la sección de educación y programas de "Médicos por la responsabilidad social", una entidad altruista. Comenzó sus estudios en el colegio universitario de la Santa Cruz; se alistó luego en el ejército norteamericano, donde cumplió el servicio de traductor de ruso y especialista en información secreta. Al licenciarse volvió a la universidad para estudiar política y relaciones internacionales. En 1978 se doctoró por el Instituto de Tecnología de Massachusetts.

GEORGE F. BERTSCH ("Vibraciones del núcleo atómico") es profesor de física en la Universidad estatal de Michigan. Inició su formación en el Swarthmore College, licenciándose en 1962. Preparó su doctorado en física en la Universidad de Princeton, defendiendo la tesis en 1965. Trabajó en Princeton y el MIT. En 1970 fue contratado por la Universidad de Michigan. "La física me interesó desde mis años adolescentes de Nueva York. Cuando ya en la facultad descubrí que la física experimental exige largas horas de trabajo a altas horas de la noche, elegí la especialidad de teórica. He ceñido mi investigación al movimiento cooperativo de sistemas de muchas partículas, siendo los núcleos el tema de la mayoría de mis trabajos."

CHRISTIAN DE DUVE ("Microcuerpos celulares") divide su tiempo de trabajo entre tres cargos con sedes muy distantes. Fundador y presidente del Instituto Internacional de Patología Celular y Molecular de Bruselas, detenta la cátedra Andrew W. Mellon de la Universidad Rockefeller y es jefe del departamento de química fisiológica de la Facultad de Medicina de la Universidad Católica de Lovaina. Aunque posee la ciudadanía belga, nació en Inglaterra en 1917. Se licenció en medicina en Lovaina en 1941. En 1949, empleando un método de fraccionamiento celular desarrollado por Albert Claude, de Duve y sus colegas de Lovaina descubrieron el lisosoma, un orgánulo de la célula viva. Por este trabajo y otros sobre estructura y función de la célula, de Duve (junto con Claude y George E. Palade) recibió el premio Nobel de medicina y fisiología en 1974. En 1962 se trasladó a la Universidad Rockefeller, pero conservó su cátedra de Lovaina. En 1975 fundó el Instituto de Patología Celular y Molecular.

WILSON G. POND ("Avances en la producción porcina") dirige la sección de nutrición del Roman L. Hruska de investigación cárnica de Clay Center, Nebraska, adscrito al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Se licenció por la Universidad de Minnesota en 1952, doctorándose, en 1957, por la estatal de Oklahoma. Desde 1957 hasta 1978, fue miembro del departamento de zootecnia de la Universidad de Cornell. En 1978 ingresó en el Centro Hruska. Ha intervenido como asesor de porcinocultura en Japón, Italia, Alemania, Taiwan y Ecuador.

J. D. BIRCHALL y ANTHONY KELLY ("Nuevos materiales inorgánicos") son, respectivamente, director de investigación del Imperial Chemical Industries (ICI) y vicerrector de la Universidad de Surrey. "Ingresé, escribe Birchall, en el ICI en 1957 después de trabajar en compañías pequeñas; durante un breve período practiqué el ejercicio libre de la profesión. Mi primera patente me fue concedida a los 19 años. En el ICI centré mis estudios en nucleación y crecimiento de cristales. Este interés se amplió hasta el comportamiento de los sólidos cristalinos ante el calor." Birchall es profesor invitado de la Universidad de Surrey. Kelly se graduó por la de Reading, en 1949, y obtuvo su doctorado en física por la de Cambridge en 1953. Tras años de especialización en varias instituciones, como la Universidad de Northwestern y la de Cambridge, se trasladó al Laboratorio Nacional de Física (inglés) en 1967, en calidad de jefe de la división de estructura inorgánica y metálica.

PERSI DIACONIS y BRADLEY EFRON ("Métodos estadísticos intensivos por ordenador") enseñan estadística en la Universidad de Stanford. La primera profesión a la que Diaconis se dedicó fue la de ilusionista. Abandonó su casa a los 14 años para trabajar con Dave Vernon, conocido experto en prestidigitación. Pasó 10 años viajando como ayudante de Vernon antes de inscribirse en los estudios de primer ciclo universitario del City College, de la universidad neoyorquina. Tras graduarse allí en 1971, alcanzó tres años más tarde el doctorado en estadística por la Universidad de Harvard. Entre sus campos de investigación se cuentan las teorías bayesianas y las aplicaciones de la probabilidad al análisis de algoritmos de ordenador. Diaconis escribe que "su pasado como ilusionista asoma en artículos que señalan errores de la moderna parapsicología o en trabajos acerca de cuántas veces deben barajarse los naipes para que su ordenación tienda a ser aleatoria." Efron, por su parte, cuenta de sí mismo: "Recibí mi título de bachiller en matemática del Instituto Tecnológico de California; me vine a Stanford en 1960 como alumno de segundo ciclo, me recibí de doctor en estadística en 1965 y he permanecido casi aferrado a Stanford desde entonces. Mi nombramiento en la Facultad de Medicina, en calidad de profesor de bioestadística, me ha proporcionado mucho campo de aplicación práctica a mis trabajos teóricos."

CONCEPCION AZCON GONZALEZ DE AGUILAR, JOSE MIGUEL BAREA y JOSE OLIVARES ("Simbiosis *Rhizobium*-leguminosa") desarrollan su labor de investigación en el Departamento de Microbiología de la Estación Experimental del Zaidín (Granada), adscrita al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Se han especializado en el estudio de los microorganismos del suelo y su influencia en nutrición vegetal. Antiguos colaboradores de *Investigación y Ciencia*, a su dilatado curriculum hay que añadir que Olivares es hoy "Principal Investigador" de un proyecto nacional sobre fijación del nitrógeno; Barea y Azcón, por su parte, han sido designados consultores de la FAO/IAEA, integrándose en sus programas de micorrizas en leguminosas.

ARTHUR T. WINFREE ("Muerte súbita de origen cardíaco: un problema topológico") es profesor de biología de la Universidad de Purdue. Se licenció en ingeniería física, en 1965, por la de Cornell. Amplió estudios de biología y física en la Universidad de Princeton, por la que se doctoró en biología en 1970. Enseñó biología teórica en la Universidad de Chicago, de 1969 a 1972, ingresando luego en el claustro docente de Purdue. Tres son las cuestiones que le preocupan especialmente: "¿cómo descifrar las curiosas peculiaridades del ritmo humano sueño-vigilia? ¿Cuáles son los centros organizadores que se forman y mantienen en medios excitables? ¿En qué consiste la turbulencia que denominamos cardíaca y cómo se inicia?"

Hace...

José M.ª López Piñero

... cuatrocientos años

Luis Collado impartió su último curso académico en la Universidad de Valencia. Nacido en la capital valenciana hacia 1520, estudió artes y medicina en su Universidad y, en circunstancias que desconocemos, se formó como anatomista al lado de Vesalio: "El fue mi único maestro en el conocimiento de la anatomía (lo confieso abiertamente) y cuanto pueda valer mi habilidad en la disección, a él, y no a otro, se lo debo". En la misma Valencia, le influyó principalmente Miguel Jerónimo Ledesma, cabeza del humanismo médico local, cuya obra póstuma se encargó de publicar en 1547. Fue, en consecuencia, un ferviente seguidor de la mentalidad humanista, intransigente con el avicenismo y la tradición medieval.

Tras ser profesor de cirugía en 1546 y 1548, Collado ocupó alternativamente la cátedra de anatomía y simples, la de "principios" y la de "práctica" desde 1550 a 1574, de acuerdo con el sistema rotatorio entonces vigente en la Universidad de Valencia. En la última fecha citada, pasó a la nueva cátedra de "práctica particular", creada a petición suya y que desempeñó sin interrupción durante diez cursos académicos. Figura médica principal de la Valencia de su época, gozó de gran prestigio e influencia, siendo Protomédico y Visitador del Reino desde 1576 hasta su fallecimiento en 1589.

Como sucesor de Pedro Jimeno, Collado fue el responsable de la consolidación del cultivo de la anatomía en la Universidad de Valencia de acuerdo con los supuestos de la reforma vesaliana. Su principal contribución al saber morfológico fue el volumen titulado *Cl. Galeni Pergameni Liber de Ossibus... Enarrationibus ilustratus*, que apareció en Valencia en 1555. Contiene tres textos de diferente longitud: un comentario al citado libro galénico, una descripción de los orificios y senos craneales y una "carta al lector" en la que justifica su defensa de Vesalio frente a los ataques del catedrático parisino Jacques Dubois (Jacobus Sylvius).

Para entender la significación histórica de esta obra de Collado, hay que tener en cuenta su antecedente inmediato: el ataque que en los años anteriores había recibido Vesalio en dos libros de Sylvius, su antiguo maestro en París. El primero había sido una edición revisada de la traducción del *Liber de ossibus* por Ferdinando Balamio, acompañada de un comentario destinado a defender a Galeno de las críticas que a su osteología se hacían en la *Fabrica*. Su tesis central era que este escrito de Galeno "trataba exclusivamente de los huesos humanos", a pesar de que algún "calumniador" se empeñara en que se refería a huesos de monos. Dos años más tarde, el ataque se hizo furioso en el célebre *Vaesani cuiusdam calumniarum in Hippocratis Galenique rem anatomicam depulsio* (1551), en cuyo título aparece el juego de palabras "Vesalius-vaesanus (loco)", que Sylvius ya había utilizado en su comentario de 1549.

La obra entera de Collado y no sólo la "carta al lector" es una defensa de Vesalio frente a los ataques del profesor parisino. Lo mismo que Sylvius, utiliza la traducción de Balamio, comenzando por afirmar que aquél había falseado el texto galénico con graves errores y omisiones. Su interés es subrayar las posturas enfrentadas de "Vesalio, egregio restaurador de la anatomía", y de "Jacobo Silvio, singular imitador de Galeno". La decisión de Collado es terminante a favor de lo que llama "libertad filosófica" de Vesalio, llegando a afirmar que Galeno "quiso adaptar su relato más bien a los huesos de los monos que a los de los hombres e incluso, en este libro, se escriben muchas cosas que sólo se hallan en los huesos de los perros". Por ello, su comentario consiste en una exposición de la osteología con arreglo a la *Fabrica* y a su propia experiencia disectiva. Su principal argumento en favor de Vesalio es lo observado en las muchas disecciones que por sí mismo había realizado. A pesar de su admiración por él, no tiene inconveniente en disentir de sus opiniones cuando chocan con los datos de su propia experiencia, como sucede, por ejemplo, al hablar de etmoides, de la sutura esfenoidal y de los agujeros que existen junto a la raíz de los incisivos. También aspira a completar las descripciones de Vesalio; incluye a este respecto la del hueso estribo, cuyo descubrimiento se arroga, afirmando haberlo realizado años atrás, en unión de su discípulo Cosme Medina, a la sazón catedrático de anatomía en Salamanca. Por otra parte, repite una y otra vez que las descripciones de Galeno son erróneas o aplicables solamente a monos o perros, calificando de "ridículo" el argumento de Sylvius de que la naturaleza humana había cambiado desde los tiempos clásicos.

En la "carta al lector" antes aludida, Collado justifica, tanto la admiración por la obra de su maestro, como sus críticas a Sylvius: "No dudo, benévolo lector, que habrá algunos a quienes desagrade nuestro trabajo porque al responder a Silvio, en favor de Vesalio, le dirija, de vez en cuando, palabras injuriosas.

"Clamarán que este varón, ilustre por su doctrina y grave por su edad, es indigno de que en nuestras explicaciones sea injuriado lo más mínimo. Sin embargo, esos hombres –lo sé de seguro– admitirán de buena gana mi excusa con tal que quiera escucharla con ecuanimidad.

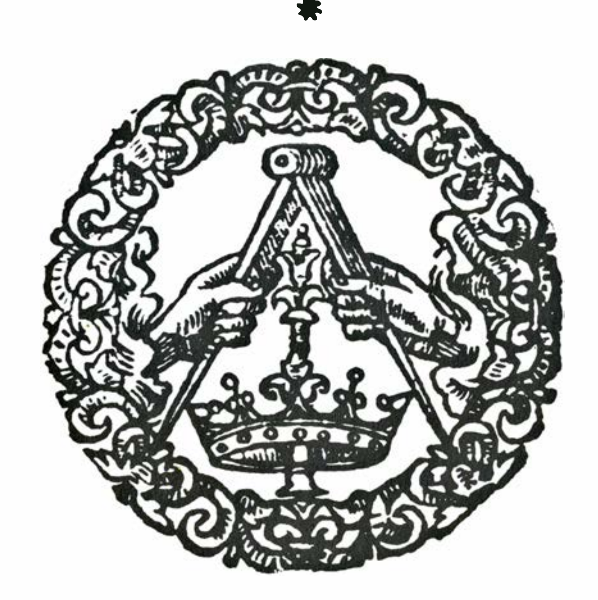
"De todos es sabido que Andrés Vesalio causó admiración con la edición de los libros sobre la fábrica del cuerpo humano. ¿Quién no se admiraría de que un joven de veintiocho años, en la tremenda oscuridad de las cosas anatómicas, tuviera una tan rara habilidad en la disección de los cuerpos y un conocimiento tan profundo de la anatomía? Con lo cual sucedió que los más aplicados se vieron incitados al aprendizaje y ejercicio de la misma. El fue mi único maestro en el conocimiento de ella (lo confieso abiertamente), y cuanto pueda valer mi habilidad en la disección, a él, y no a otro, se lo debo.

"Por lo que, al tener en cuenta su laboriosa entrega durante los años juveniles, al servicio de la disección, su eximia diligencia en indagar y desvelar la verdad, y leer las obras anatómicas de Jacobo Silvio en las que llama a Andrés Vesalio arrogante, desvergonzado, ignorante, impío, insolente, obstruidor de la verdad y de la naturaleza, el más maldiciente, calumniador y finalmente

CL. GALE-
NI PERGAMENI LI-
ber de Oßibus ad tyrones, interprete Ferdi-
nando Balamio Siculo,

Enarrationibus illustratus à Lodouico
Collado Valentino, publico
artis Medicæ doctore.

*



Cum priuilegio ad decennium

VALENTIAE,
Ex typographia Ioannis Mey Flandri.

1555.

1. *Portadilla de* **Cl. Galeni Pergameni Liber de Ossibus ad tyrones**, *principal atribución al saber morfológico de Luis Collado.*

malvado, no pude evitar el que, al defender ardientemente a mi maestro Vesalio, me mostrara en ocasiones demasiado duro con Jacobo Silvio. Pues si un anciano, porque un joven –que se esfuerza por trabajar en utilidad de todos– disienta en algo de Hipócrates y de Galeno, en vez de avisarle como a discípulo le ataca con impaciencia, ¿por qué hay que extrañarse si yo, conmovido por la indignidad de tal acción, imito la libertad de hablar del anciano, por no decir su licencia? Por lo cual, si hay alguien que lleve esto a mal, sepa que respondí y no que me adelanté a hablar. Pues soy tan admirador de Jacobo Silvio como el que más; en algún tiempo fui yo el único que cogí sus libros para explicarlos públicamente en la escuela de Valencia.

"Adiós, lector, y si amas la verdad procura no anteponer a ella la piedad".

Esta lúcida defensa de las ideas de Vesalio fue la primera que se publicó en Europa, junto a la *Apologia* (1555) del médico de Lindau, Renatus Henerus. El libro de Collado, sin embargo, es de mucha mayor importancia como reflejo de una de las primeras escuelas europeas que cultivó la enseñanza y la indagación anatómica de acuerdo con los supuestos vesalianos. El último de los textos que contiene, titulado "Ossium capitis foraminum, et sinum ad tyrones brevis descriptio", corresponde precisamente a una de las lecciones de Collado, que publicó a petición de sus discípulos.

Collado pesó decisivamente en el desarrollo de la enseñanza anatómica en la Universidad de Valencia y en que asimilaran la nueva morfología las principales figuras médicas valencianas de la segunda mitad del siglo XVI, como Juan Calvo y Jaime Segarra. Influyó también en la introducción de la anatomía vesaliana en las universidades de Salamanca y Alcalá.

Como médico, Collado evolucionó, desde la postura humanista centrada en la depuración de los textos clásicos, hasta un galenismo "hipocratista" que situó en primer plano la observación clínica. Esta trayectoria se refleja en su libro *Ex Hippocratis et Galeni monumentis Isagoge* (1561) y, sobre todo, en sus numerosos manuscritos de tema patológico, clínico y terapéutico. Aprovechó su destacada posición dentro de la medicina valenciana para oponerse eficazmente a la resistencia de los partidarios de la tendencia arabizante. Por ejemplo, como titular de la nueva cátedra de "práctica particular", creada, como hemos dicho, a petición suya, se le ordenó que utilizara textos de Avicena, Rhazes y otros de la misma orientación. Un documento de 1575 afirma, sin embargo, que "lo dit doctor Collado may ha volgut abtemperar al que li es stat manat".

OMISION

En la figura 5 del artículo "UNA ZONA DESNUCLEARIZADA EN EUROPA"

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1983, págs. 16-17 se omitieron las dos últimas líneas, que decían:

máximo es de unos 85 kilómetros. Las ojivas nucleares del Este se encuentran bajo custodia soviética.

Armas inteligentes en la guerra naval

El impresionante comportamiento de las armas con guía de precisión en la reciente guerra de las Malvinas pone en entredicho la política tendente a dotar a las flotas navales de buques de superficie grandes y costosos

Paul F. Walker

El conflicto desencadenado en 1982 entre Gran Bretaña y la República Argentina por el control de las islas Malvinas revistió particular interés para los estados mayores militares y cuantos intervienen en la evaluación del efecto que puedan tener las modernas armas con guía de precisión en el futuro de la guerra naval. De los 114 aviones de combate y 10 buques perdidos por ambas partes en los dos meses que duró el conflicto, más de la mitad los dejaron fuera de servicio esas armas inteligentes. Se perdieron 61 aviones de combate argentinos derribados por misiles superficie-aire y aire-aire, tres buques británicos destruidos por misiles aire-superficie y superficie-superficie y un navío argentino (el anticuado crucero pesado *General Belgrano*) hundido por un torpedo con guía acústica lanzado por un submarino. Otros nueve aviones británicos y 44 argentinos, más tres buques de superficie británicos y tres argentinos, fueron blanco de medios más convencionales, como fuego de cañón, bombardeo aéreo o accidentes.

Desde el punto de vista de la planificación de la fuerza naval, la más significativa fue la pérdida del destructor británico H.M.S. *Sheffield*, alcanzado poco después de las dos de la tarde del 4 de mayo de 1982 por un misil Exocet, de fabricación francesa, lanzado desde más de 30 kilómetros de distancia por un caza-bombardero argentino Super Étendard, también de fabricación francesa. En el momento del ataque, el buque se hallaba en misión de descubierta al sudeste de las Malvinas, al oeste del cuerpo principal de la flota británica. El misil, que vuela rozando la superficie del mar y se autodirige por radar, alcanzó al *Sheffield* en el centro del casco, casi a dos metros por encima de la línea de flotación, provocando un incendio que rápidamente desmanteló la mayor parte de los sistemas de gobierno, incluidos los equipos de lucha contra incendios. Cinco horas después del ataque, cuando las llamas se propagaban peligrosamente hacia los pañoles de la munición, se dio orden de abandonar el navío. Después de un intento fracasado de remolcarlo fuera del escenario del combate, se echó a pique el casco; veinte marineros británicos perecieron en el ataque.

La destrucción del *Sheffield* constituyó una impresionante demostración de la favorable relación coste-eficacia de las modernas armas con guía de precisión. Era aquel un destructor de primera categoría, de unas 4000 toneladas; construido hace unos 10 años, costó alrededor de los 50 millones de dólares. Estaba dotado de uno de los más avanzados sistemas defensivos disponibles; lo que no fue obstáculo para caer ante un impacto certero de un misil pequeño, de medio alcance, que apenas había costado unos centenares de miles de dólares.

¿Qué nos enseña este incidente, si es que podemos sacar de él alguna lección? ¿Acaso la aparición de misiles-antibuque inteligentes, del tipo del Exocet, cierra una era en la guerra naval, como se ha llegado a sugerir? ¿Han de pasar a la historia los grandes y costosos navíos de superficie, presa fácil de una nueva generación de armas con guía de precisión, baratas y mortíferas, que pueden dispararse desde aviones, pequeños patrulleros, submarinos o baterías costeras? O bien, como también se ha avanzado, ¿pueden aplicarse en alta mar medidas defensivas de parejo refinamiento que convertirían en excepcionales incidentes de ese tenor? La revisión de las bases técnicas de este debate no puede ser más oportuna, a la vista de los planes de la administración Reagan para incrementar la flota estadounidense en más de 100 nuevos navíos de guerra, incluyendo dos portaeronaves a propulsión nuclear cuyo coste estimado rebasa los 3500 millones de dólares cada uno.

El fabricante del misil Exocet, la compañía francesa Societé Nationale Industrielle Aerospatiale, garantiza que se trata de un arma de suma confianza, "capaz de destruir cualquier navío de superficie" con una "probabilidad de acierto" por encima del 90 por ciento. Al lado de otros misiles de su tipo, el Exocet no destaca por su magnitud; mide menos de cinco metros de largo y no llega a los 700 kilogramos de peso, incluyendo la ojiva, de unos 160 kilogramos de material altamente explosivo, y una carga completa de combustible. El misil va propulsado por un motor cohete de combustible sólido de dos etapas; su alcance máximo es de 40 a 65 kilómetros, según el modo de lanzamiento. Se han diseñado distintos modelos para su lanzamiento desde aeroplanos, helicópteros, buques de superficie o instalaciones costeras. Introducido en 1972, el Exocet opera en la escuadra francesa desde 1978; al menos otras 17 naciones lo han adquirido ya. Hasta la fecha se ha instalado en más de 180 navíos, incluyendo la fragata más joven de la escuadra británica, la H.M.S. *Beaver*, que no estuvo lista a tiempo para intervenir en la guerra de las Malvinas.

En un lanzamiento aéreo típico de un misil antibuque, como el Exocet, el piloto del avión atacante vuela a baja co-

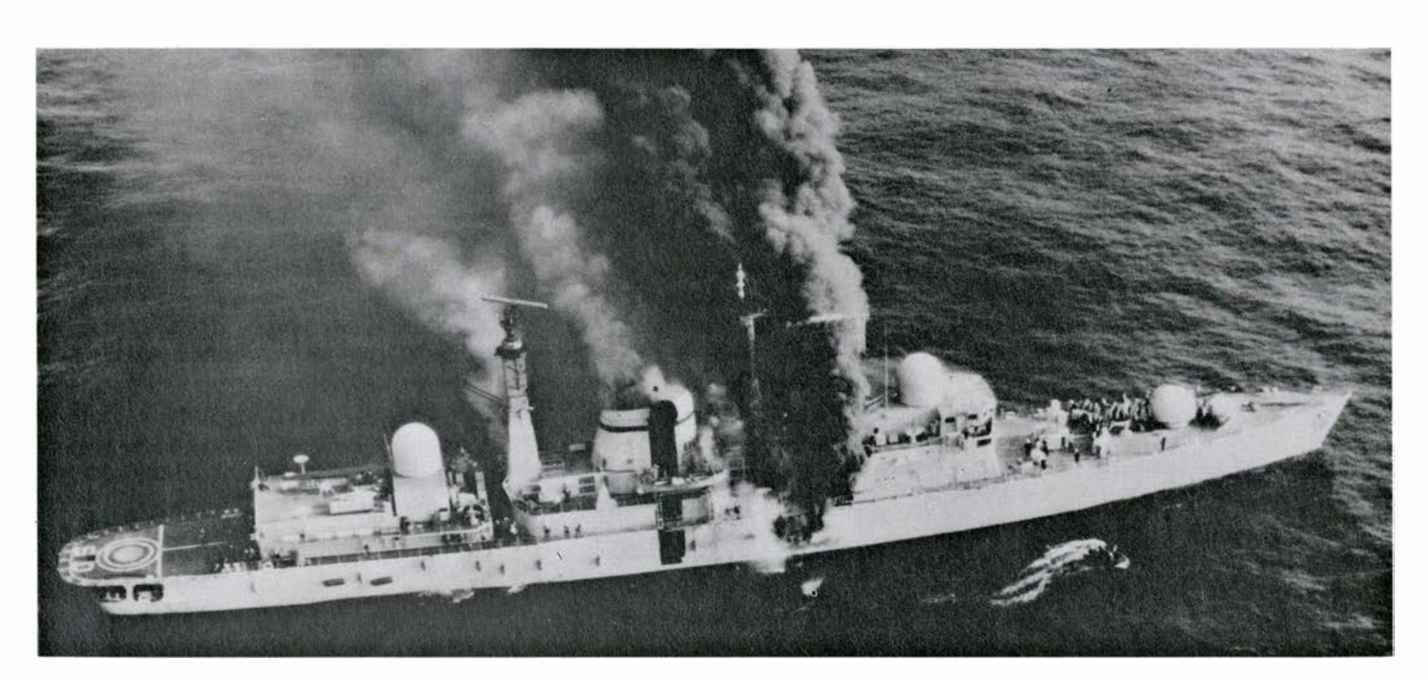
ta sobre las aguas, por debajo de la cobertura de radar del defensor, hasta que debe lanzar el misil. El avión se eleva entonces brevemente para definir el blanco, descendiendo de nuevo bajo la cobertura de radar cuando se han fijado en la memoria microelectrónica del misil las coordenadas del objetivo. El misil se lanza en la modalidad "dispara y olvida" (*fire and forget*); recorre la última porción de su trayecto impulsado por medios propios y en su mayor parte bajo el control de su sistema de guía inercial y de su radio-altímetro; este último dispositivo permite al misil deslizarse a ras de superficie, a unos pocos palmos sobre la superficie del mar. Al acercarse a su objetivo, se eleva ligeramente para explorar el horizonte y fija su radar de autoguiado terminal sobre el blanco. Se ha diseñado la ojiva del misil para que primero perfore el casco del buque y luego detone.

Era en este caso el *Sheffield* el objetivo del Exocet. Se trataba de uno de los 10 destructores tipo 42 construidos durante la última década para prestar servicio en la flota británica del Atlántico Norte. Se diseñaron todos ellos para servir de plataformas de lanzamiento del nuevo misil contra aeronaves Sea Dart, y tienen por misión específica proporcionar defensa aérea a las fuerzas navales de la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN). Los destructores del tipo 42 están equipados con 20 misiles Sea Dart, un cañón automático de 115 milímetros Vickers en la cubierta delantera, dos cañones Oerlikon de 20 milímetros a popa y un helicóptero, armado con cuatro misiles antibuque Sea Skua, en la cubierta posterior.

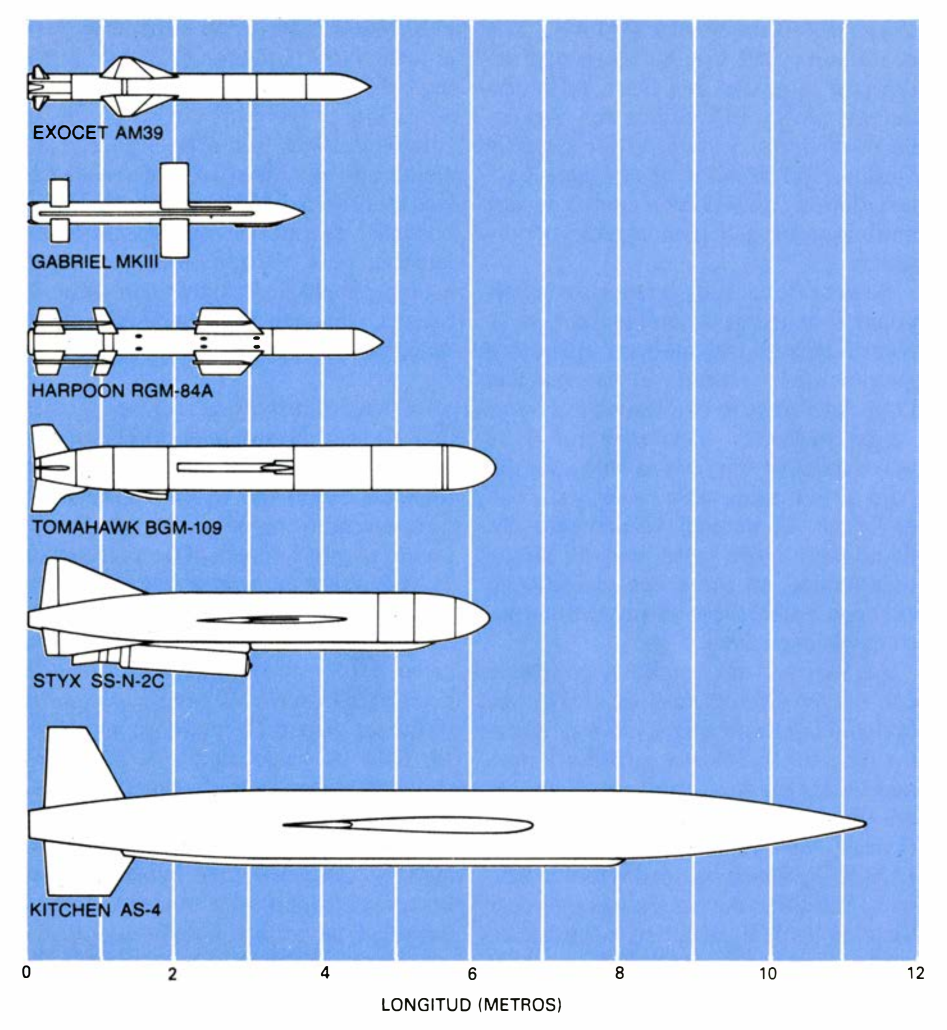
Se consideran muy buenos los rendimientos de los destructores del tipo 42 contra aviones que ataquen volando a gran o media altitud. El sistema Sea Dart derribó ocho aviones en la guerra de las Malvinas. El ataque del 4 de mayo sobre el *Sheffield* se lanzó por debajo de la cobertura de radar, y cuando el Exocet se detectó visualmente era demasiado tarde para que el buque reaccionara, ya fuera con el fuego de cañones antimisiles, ya mediante contramedidas pasivas.

El *Sheffield* no estaba pertrechado con otro avanzado misil defensivo británico, el Seawolf, diseñado específicamente para la defensa próxima y para una rápida reacción contra esas amenazas de vuelo rasante. Dos fragatas británicas, las H.M.S. *Broadsword* y H.M.S. *Brilliant*, equipadas con el Seawolf, lo utilizaron con éxito en el conflicto de las Malvinas, derribando cinco aviones enemigos que atacaban a baja altitud. Probablemente, ni siquiera equipado con misiles Seawolf hubiera el *Sheffield* esquivado el impacto, pues al producirse el ataque el buque no tenía en funcionamiento su radar de exploración activa para no interferir las comunicaciones. (Es más, según un reciente informe, un sistema de radar pasivo a bordo del *Sheffield* detectó el haz buscador de radar del misil que se aproximaba, pero el ordenador del buque estaba programado para identificar el Exocet como un misil "amigo", y por tanto no dio la alarma.)

Los argentinos dispararon seis misiles Exocet durante el conflicto de las Malvinas. Cuatro de ellos alcanzaron distintos objetivos. El primer misil, el que incendió el *Sheffield*, probablemente se lanzó contra el portaeronaves H.M.S. *Hermes*, que se hallaba próximo; aparentemente, los dos buques fueron confundidos en la pantalla de radar del Super Étendard. El segundo Exocet, lanzado casi simultáneamente desde un Super Étendard acompañante, falló su golpe contra el *Sheffield*, cayendo al mar antes de llegar a la altura del *Hermes*. Tres semanas más tarde, el buque mercante transformado *Atlantic Conveyor*, que había entregado un cargamento de aviones Harrier de despegue vertical a las fuerzas británicas y transportaba suministros y helicópteros entre las islas, fue alcanzado y destruido por dos Exocet, lanzados



1. EL H.M.S. "SHEFFIELD" arde de forma incontrolada tras ser alcanzado por un misil Exocet lanzado desde un avión argentino durante la guerra de las Malvinas del año 1982. El misil, de pequeño tamaño, vuela a ras de las olas y está dotado de un sistema de autoguiado por radar; lo disparó desde unos 30 kilómetros de distancia un caza-bombardero del tipo Super Étendard en vuelo rasante. (Ambos, el misil y el avión, son de fabricación francesa.) El destructor británico del tipo 42, de 4000 toneladas de desplazamiento, estaba equipado con misiles antiaéreos Sea Dart y otros modernos sistemas de defensa de buques. Recibió el impacto aproximadamente en el centro del casco, casi dos metros por encima de la línea de flotación, en las proximidades del centro de operaciones del buque. Esta fotografía aérea se tomó antes de darse la orden de abandonar el buque. Se distinguen sobre las cubiertas de proa y popa a los miembros de la tripulación no dedicados a luchar contra el fuego. Un pequeño bote hinchable se aleja del navío después de un recorrido de inspección de los daños. Los británicos decidieron finalmente echar a pique el casco incendiado del *Sheffield*. Veinte marineros perecieron en el ataque.



MISILES ANTIBUQUE	AÑO DE PUESTA EN SERVICIO	ALCANCE (KILO-METROS)	VELOCIDAD (NUMERO DE MACH)	TIPO DE OJIVA	COSTE ESTIMADO ($ DE 1982)
EXOCET AM 39 (FRANCIA)	1979	50+	0,93	CONVENCIONAL	?
GABRIEL MK III (ISRAEL)	1979	60+	0,73	CONVENCIONAL	400.000
HARPOON RGM-84A (EE.UU.)	1977	90	0,90	NUCLEAR O CONVENCIONAL	1 MILLON
TOMAHAWK BGM-109 (EE.UU.)	1982	450	0,74	NUCLEAR O CONVENCIONAL	3 MILLONES
STYX SS-N-2C (U.R.S.S.)	1965(?)	80	0,90	CONVENCIONAL	?
KITCHEN AS-4 (U.R.S.S.)	1962	300+	2+	NUCLEAR O CONVENCIONAL	?

2. MISILES ANTIBUQUE MAS REPRESENTATIVOS. Se ilustran a escala en la parte superior de la figura; se reseñan sus características en la tabla inferior. Los misiles del tipo Exocet se han proyectado para lanzarlos desde aeroplanos, helicópteros, buques e instalaciones costeras; el modelo concreto que aquí se muestra, el Exocet AM 39, se arroja desde un avión; es el que destruyó al *Sheffield*. El misil antibuque ruso que los servicios de información occidentales denominan Styx lo utilizó la marina egipcia en 1967 para hundir al destructor israelí *Elath*. El gran misil ruso denominado AS-4 se carga en el bombardero Backfire; puede llevar una ojiva convencional de material altamente explosivo o una ojiva nuclear. Los números de Mach son múltiplos de la velocidad del sonido, unos 340 metros por segundo.

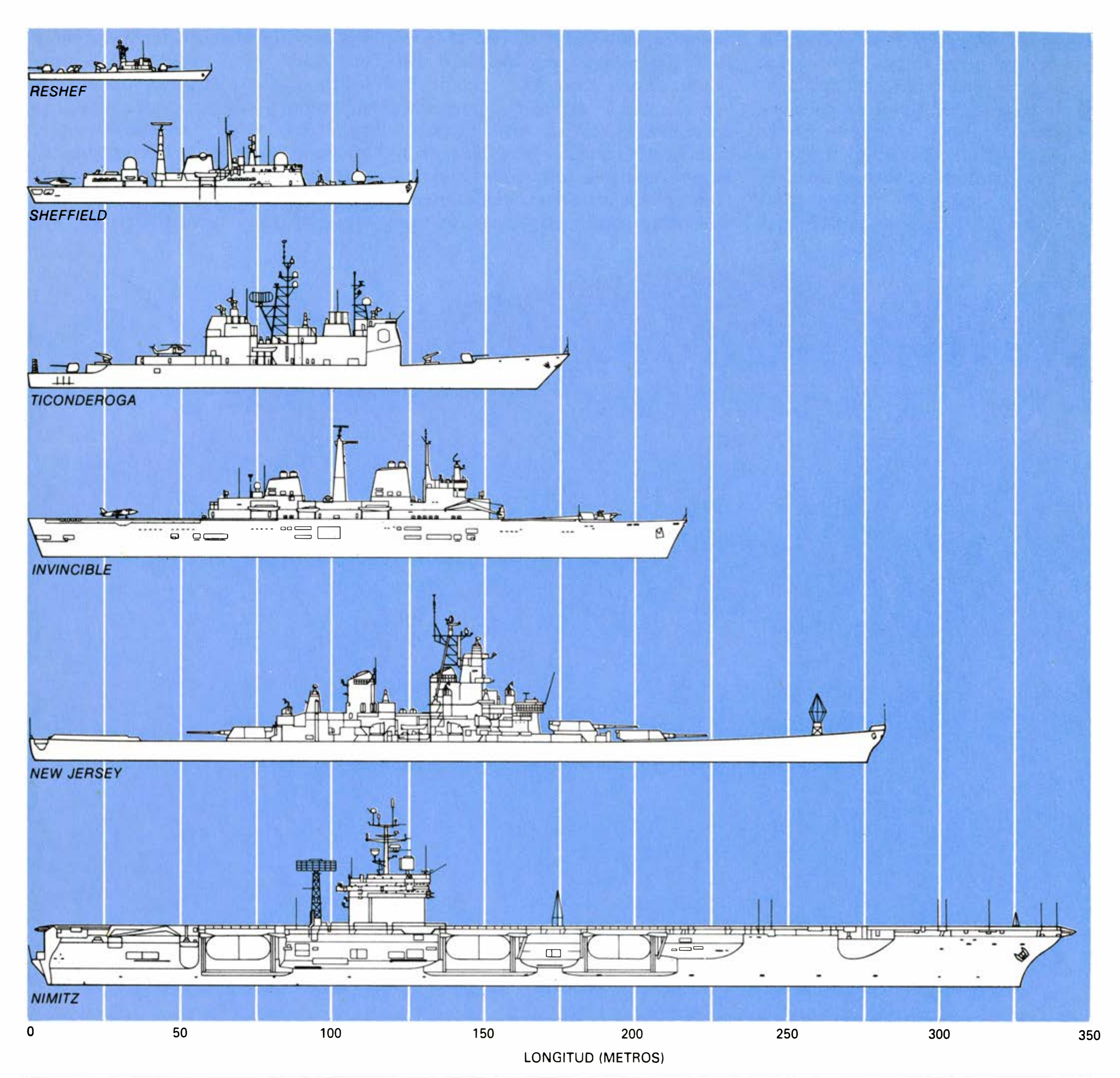
también desde aviones Super Étendard. El ataque de un quinto Exocet, cinco días más tarde, falló. El sexto, lanzado desde una batería costera el 11 de junio, alcanzó al destructor portamisiles H.M.S. *Glamorgan*, que resultó seriamente dañado, aunque permaneció a flote.

La proporción del 67 por ciento de éxitos del Exocet es notable, dado lo novedoso que los aviones y el sistema de misiles franceses resultaban para las fuerzas argentinas. Cabe señalar al respecto que los argentinos encontraron dificultades para armar adecuadamente los Exocet durante la guerra. Cuando el primer misil perforó el casco del *Sheffield*, su ojiva no hizo explosión; sin embargo, contenía aún una cantidad importante de propulsor no consumido, que hizo explosión e incendió parte del combustible del buque. Por fortuna para el bando argentino, el misil hizo impacto en un punto particularmente vital, próximo al centro de operaciones del buque.

El éxito del Exocet al destruir un objetivo cientos de veces más caro ha sido interpretado, en general, como una demostración de la vulnerabilidad que acecha a todos los buques de guerra de superficie. Pero algunos analistas militares extraen conclusiones completamente diferentes. Portavoces navales británicos, por ejemplo, citan el incidente del *Sheffield* en apoyo de su petición para una reconstrucción acelerada de la flota de superficie británica; señalan que el *Sheffield* se proyectó para tareas de defensa de zona, en coordinación con las grandes flotas de la OTAN y con la cobertura aérea altamente capacitada de los portaeronaves de la fuerza expedicionaria norteamericana en el Atlántico Norte. Los oficiales navales británicos critican las reducciones de los presupuestos de defensa de su país durante la pasada década, señalando que hace menos de veinte años había en la flota británica cinco portaviones de cubierta larga. El último portaeronaves de ese tipo, el H.M.S. *Ark Royal* fue retirado del servicio en 1978, dejando la cobertura aérea de la flota a los portaeronaves, de mucho menor tamaño, de las clases *Hermes* e *Invencible*, aptos tan sólo para aviones de despegue vertical.

El Departamento de Marina estadounidense opina de forma parecida. El secretario del organismo, John F. Lehman, Jr., sostiene que no debe sorprender que un misil autoguiado de las características del Exocet alcanzara a un buque aislado, en tareas de descubierta, sin adecuada defensa anti-misil y sin cobertura aérea, y añade que: "si un buque norteamericano hubiera sido el objetivo de un ataque argentino, no habría penetrado en el radio de destrucción del misil".

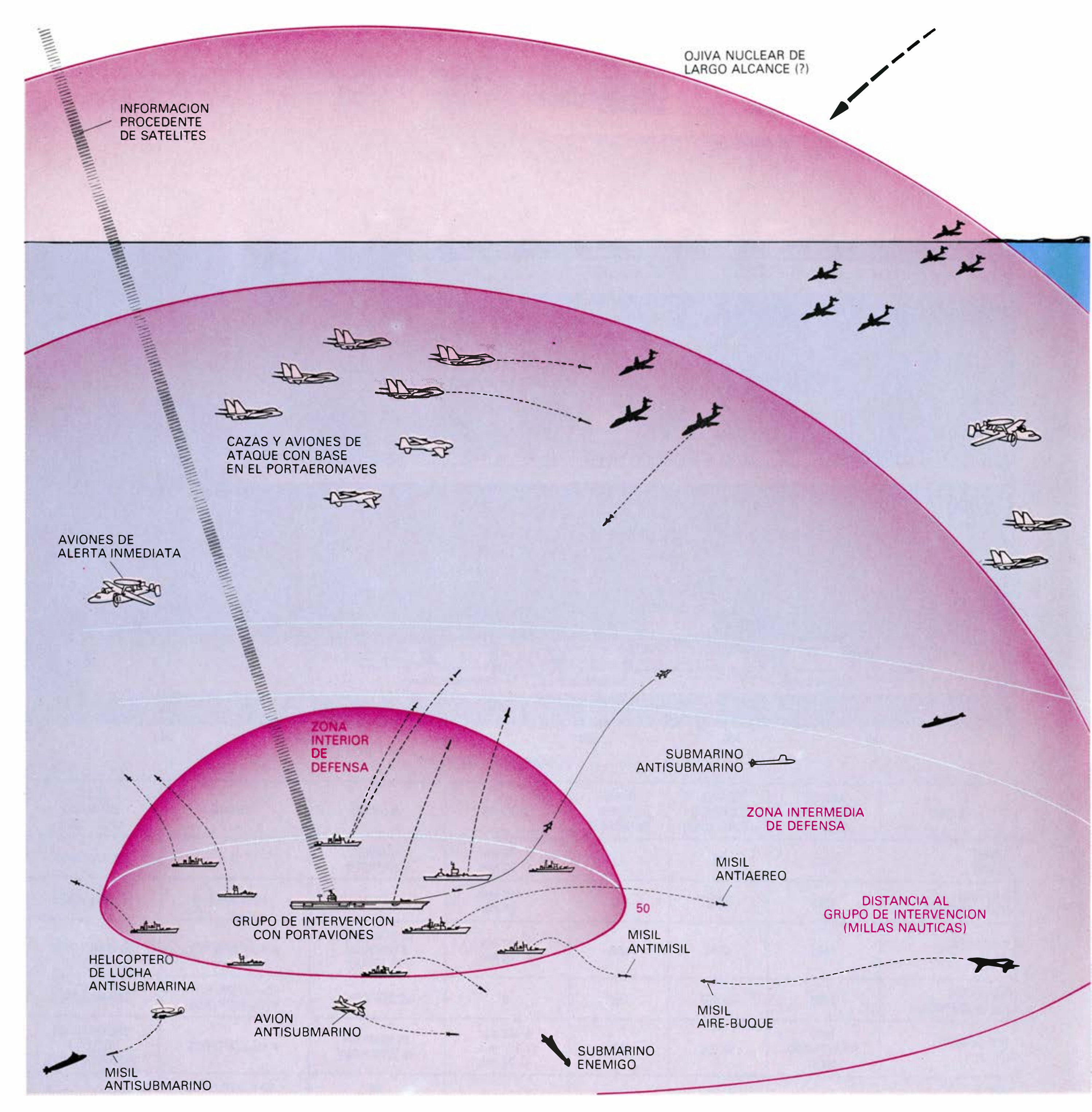
En este punto probablemente lleve razón Lehman. Los Estados Unidos despliegan sus fuerzas navales, que ahora suman casi 500 buques de guerra, alrededor de 13 grandes portaviones de cubierta larga. Los planes en desarrollo pretenden incrementar el número de buques a más de 600, que se organizarían en 15 grupos de intervención y cuatro de combate. (Cada una de estas últimas formaciones se centraría en un



BUQUE	AÑO DE PUESTA EN SERVICIO	DESPLA-ZAMIENTO (TONELADAS)	TRIPU-LACION (HOMBRES)	CAÑONES	MISILES	AVIONES	COSTE ESTIMADO ($ DE 1982)
RESHEF (ISRAEL)	1973	450	45	2 76 mm. 2 20 mm.	5 GABRIEL 4 HARPOON	0	50 MILLONES
SHEFFIELD (GRAN BRETAÑA)	1975	4000	270	1 115 mm. 2 20 mm.	20 SEA DART	1 HELICOPTERO	150 MILLONES
TICONDEROGA (EE.UU.)	1983	9000	330	2 127 mm. 2 20 mm.	68 STANDARD 8 HARPOON 20 ASROC	2 HELICOPTEROS	1000 MILLONES
INVINCIBLE (GRAN BRETAÑA)	1980	20.000	1300	0	22 SEA DART	5+ AVIONES Y 9 HELICOPTEROS	525 MILLONES
NEW JERSEY (EE.UU.)	1943 (REACTIVADO 1983)	58.000	1600	9 406 mm. 12 127 mm. 4 20 mm.	16 HARPOON 32 TOMAHAWK	4 HELICOPTEROS	326 MILLONES (SOLO LA MODERNIZACION)
NIMITZ (EE.UU.)	1975	91.000	6300	3 20 mm.	24 SEA SPARROW	80+AVIONES Y 10+ HELICOPTEROS	3500 MILLONES

3. BUQUES DE GUERRA MAS REPRESENTATIVOS. Las rápidas patrulleras israelíes de la clase *Reshef* constituyen un ejemplo de los cientos de pequeños navíos lanzamisiles que se están introduciendo en muchas fuerzas navales. El norteamericano *Ticonderoga* es el primero de los 17 modernos cruceros de defensa programados por la armada estadounidense para su flota. Los portaeronaves de despegue vertical, como el *Invincible*, han reemplazado a los portaviones de cubierta larga en la flota británica. El acorazado norteamericano *New Jersey*, construido durante la segunda guerra mundial, ha entrado de nuevo en servicio a principos de este año. La administración Reagan proyecta construir al menos dos portaviones de la clase *Nimitz*.

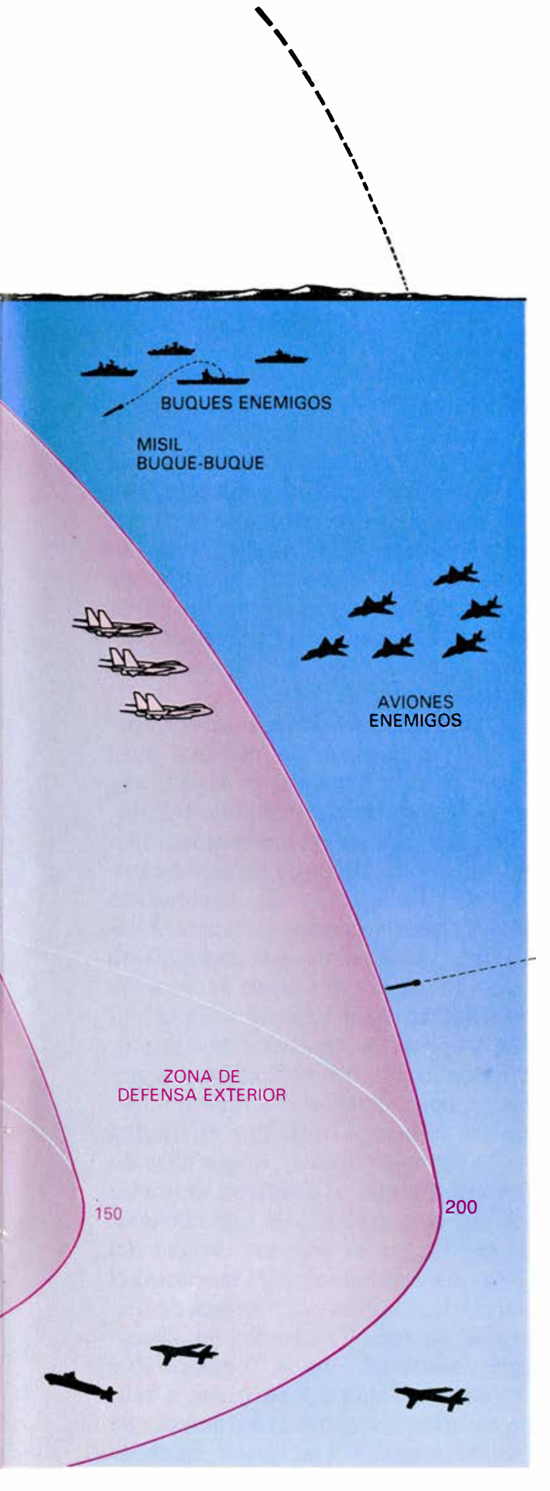
acorazado modernizado, procedente de la segunda guerra mundial.) Un grupo de intervención es una formidable fuerza de combate. Un portaeronaves de propulsión nuclear de la clase *Nimitz* desplaza aproximadamente 90.000 toneladas, cuatro veces el desplazamiento de cada uno de los portaeronaves británicos que intervinieron en la guerra de las Malvinas (y más de 20 veces el desplazamiento del *Sheffield*). El U.S.S. *Nimitz* tiene una cubierta de vuelo de casi 2 hectáreas, y transporta un centenar de aeronaves: aviones de caza, bombarderos, aviones de vigilancia marítima y de lucha antisubmarina (helicópteros incluidos), y helicópteros de servicio interior y de rescate. Al menos dos tercios de las aeronaves están empeñadas en la defensa de la flota contra el ataque de aviones, buques de superficie y submarinos. La treintena de aviones restante se reserva para el ataque. Un grupo de intervención incluye además cierto número de otros buques –cruceros, destructores, submarinos y buques de abastecimiento– cuya



4. ZONAS DE DEFENSA previstas para proteger un grupo de intervención con portaviones contra diversos ataques. En la zona exterior, los aviones, submarinos y buques de superficie agresores son detectados e identificados por satélites de vigilancia o por aviones de alerta inmediata con base en el portaviones, submarinos y aviones de lucha antisubmarina. En la zona intermedia, misiles superficie-aire y misiles antisubmarinos lanzados por buques y helicópteros se oponen a los aviones, misiles y submarinos atacantes. En la zona interior se utilizan, como último recurso, los sistemas de "defensa pun-

misión consiste en proteger y pertrechar en la mar al grupo de intervención por períodos de hasta seis meses.

La defensa de un grupo norteamericano de intervención se articula en tres grandes zonas. En la zona exterior, los principales interceptores son submarinos y aviones con base en el portaeronaves; en la zona intermedia predominan los misiles lanzados desde buques y helicópteros; finalmente, en la zona interior se utilizan como último recurso armas de defensa puntual, de corto alcance, como misiles antimisil y cañones automáticos de tiro rápido. El supuesto agresor –avión, misil, barco o submarino– habría de atravesar con éxito las tres zonas para alcanzar al buque insignia: el portaeronaves.



tual": cañones de tiro rápido y misiles antimisil de alta velocidad. Las tres zonas se delimitan aquí un tanto arbitrariamente; de hecho se solapan considerablemente. Las siluetas no están a escala.

Un portaviones de la clase *Nimitz* dispone de cuatro aviones E-2C de alerta inmediata, equipados con radares de vigilancia de largo alcance. El E-2C vuela por encima o cerca del grupo de intervención, a 7500 o 9000 metros de altitud, extendiendo "el campo de visión" del grupo de combate desde las 30 millas náuticas hasta más de 200 millas. Se dice que el E-2C detecta, identifica y sigue más de 600 objetivos aéreos y de superficie simultáneamente. Puede dirigir más de 40 aviones de combate desde sus circuitos de patrulla aérea hacia objetivos distintos.

El principal avión de combate con base en portaeronaves de la armada norteamericana es, hoy, el F-14, un avión a reacción de geometría variable y elevadas prestaciones que puede volar a velocidades superiores a Mach 2 (es decir, más de dos veces la velocidad del sonido). El F-14 está equipado con ocho misiles aire-aire con guía de precisión y cañón de 20 milímetros. Los aviones en servicio de patrulla aérea se mantienen alejados unos 250 o 350 kilómetros del portaviones; son capaces de detectar bombarderos a 270 kilómetros y misiles-crucero a 100 kilómetros. El sistema de radar del F-14, que dispara los misiles Phoenix, puede vigilar simultáneamente 24 objetivos y coordinar al mismo tiempo el ataque sobre seis, hasta un alcance máximo de 95 kilómetros. En resumen, la zona de defensa exterior de un grupo de intervención norteamericano está bien equipada para hacer frente a amenazas múltiples hasta distancias de más de 300 kilómetros del portaviones.

La segunda zona de defensa se apoya principalmente en los misiles superficie-aire, con base en el resto de los buques del grupo de intervención. La mayor parte de los cruceros, destructores y fragatas de la marina estadounidense están equipados con lanzamisiles superficie-aire, que disparan misiles Talos, Terrier, o Tartar. En la actualidad están entrando en servicio los más modernos misiles antiaéreos de la flota norteamericana, los Standard 1 y Standard 2, capacitados para salir al paso de cualquier avión enemigo a distancias comprendidas entre 6,5 y 140 kilómetros y a altitudes de hasta 24.000 metros. El tiempo adquiere aquí importancia vital; se dispone de minutos escasos para interceptar un avión supersónico o un misil en la zona de defensa media.

Si algún avión o misil logra atravesar las dos primeras zonas de defensa, restan aún diversas opciones para detenerlo. En los últimos kilómetros de vuelo, el atacante puede ser abatido por los cañones antiaéreos clásicos, presentes todavía en la gran mayoría de los buques, pero a buen seguro se les opondrán también modernos sistemas de defensa puntual. El más moderno de los misiles de defensa puntual a bordo de los buques norteamericanos es el Sea Sparrow de la OTAN, un misil supersónico de unos cuatro metros de longitud, provisto de un sistema de autoguiado por radar. El más moderno de los cañones de defensa puntual es el Phalanx, de tipo Gatling, que pesa seis toneladas, totalmente automático y con seis tubos giratorios, del que se dice que es capaz de disparar una "muralla de proyectiles" a una cadencia de 50 disparos por segundo. Los proyectiles tienen un núcleo de uranio empobrecido, extremadamente denso, que les confiere una potente capacidad de perforación. El fuego se abre contra el objetivo que se aproxima mediante un sistema de control en "bucle cerrado", que simultáneamente sigue a los proyectiles y al objetivo, ajustando la puntería del cañón hasta el impacto sobre aquél. Si a bordo del *Sheffield* hubiera habido un Phalanx quizá habría detenido al Exocet; así parecen creerlo los británicos, puesto que acaban de instalar dos de esos cañones en su más moderno portaviones: el H.M.S. *Illustrious*.

Además de tales sistemas de defensa puntual activa, se cuenta con un amplio abanico de contramedidas pasivas: maniobras evasivas, perturbación electrónica del radar del atacante, lanzamiento de señuelos de infrarrojos o dispersión de nubes de cintas metálicas que confunden a los sistemas radáricos de guía de los misiles que se aproximan. Tanto los señuelos de infrarrojos como las nubes de cintas metálicas los utilizaron con éxito los ingleses en la guerra de las Malvinas.

En sus continuos esfuerzos por reforzar la defensa de los buques, la marina norteamericana encargó a principios de este año su primer crucero portamisiles, de la clase Ticonderoga, muy bien

equipado para la defensa de un grupo de intervención centrado en un portaeronaves. La marina estadounidense ha propuesto la construcción de 17 de esos navíos, cuyo coste es de unos 1000 millones de dólares la unidad; todos ellos estarían dotados del nuevo sistema de mando y decisión Aegis e irían equipados con 68 misiles Standard 2, 20 misiles ASROC, ocho misiles Harpoon contra buques de superficie y dos cañones Phalanx, además de otras armas menores. El corazón del sistema Aegis es el radar Spy-1, de haces múltiples, capaz de barrer el horizonte en la cuarta parte del tiempo que sus predecesores. El sistema ha sido diseñado para detectar y seguir objetos que se aproximen en mayor número y en las circunstancias más extremas (altas y bajas cotas, altas y bajas velocidades, grandes y pequeñas superficies de reflexión radárica), con una rapidez, flexibilidad y potencia de fuego sin precedentes.

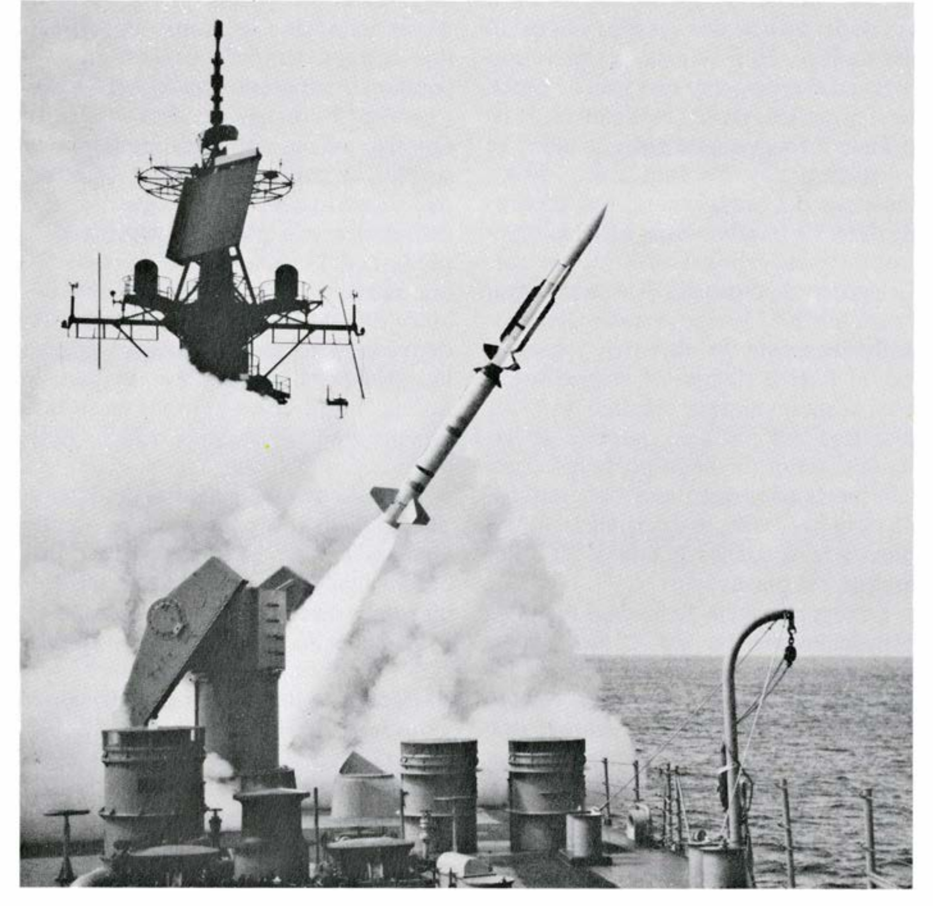
La defensa de la flota americana parece altamente eficaz. Si tal fuerza de intervención hubiese entrado en combate en las Malvinas pocos, si alguno, de los misiles de vuelo rasante habrían alcanzado sus objetivos. No obstante, la confianza en las defensas de cualquier flota debe matizarse, particularmente a la vista de ciertas limitaciones operativas evidentes, de la pasada experiencia y en consideración al potencial del enemigo.

Las limitaciones operativas de las defensas de la flota americana son numerosas. Si los aviones E-2C de patrulla aérea detectan un ataque, el portaviones puede enviar, como máximo, 24 aviones de caza, equipado cada uno con ocho misiles aire-aire. Ello supone un total de 192 disparos contra los aviones y los misiles atacantes, lo que probablemente basta en enfrentamientos circunscritos, pero no en un conflicto generalizado. Por esa razón, y por otras, las fuerzas de intervención apoyadas en portaviones suelen operar por parejas, duplicando el número de aviones interceptores disponibles.

Según la marina americana, los misiles Phoenix a bordo de los cazas F-14 tienen una probabilidad de destrucción del 80 por ciento. Sin embargo, el Servicio de Adquisiciones (*General Accounting Office*) informó al Congreso en 1979 de que el arma no sería capaz de mantener tal nivel de eficacia frente a la actual generación de aviones de combate rusos. Otro misil aire-aire del arsenal norteamericano, el Sidewinder, dotado de cabeza buscadora de infrarojos, demostró su gran fiabilidad en el conflicto de las Malvinas, abatiendo 24 de los 27 aviones contra los que fue disparado, esto es, una probabilidad de destrucción del 89 por ciento. No obstante, parece inevitable cierta penetración del perímetro de defensa exterior de un grupo de intervención. Podría lograrse mediante una combinación de tácticas, como perturbación de los radares de la defensa, ataque con éxito sobre los aviones E-2C o F-14, despliegue de señuelos o simplemente por saturación de las defensas con un abrumador número de aviones y misiles atacantes.

La eficacia de la zona intermedia de defensa de la flota depende de la potencia y de la rapidez del sistema de control del combate defensivo. Los misiles y aviones supersónicos atacantes obligan a que en pocos minutos el sistema defensivo detecte el objetivo, lo identifique, lo siga, lo traspase al radar de control de fuego y dispare el misil de defensa; todo ello antes de que el enemigo se sitúe a pocos kilómetros del portaeronaves.

A falta del sistema Aegis, se considera que el sistema de defensa misil superficie-aire Tartar-D es el más eficaz de la flota norteamericana. No obstante, presenta graves limitaciones operativas; por ejemplo: las antenas giratorias de sus radares de exploración tardan cuatro segundos en barrer el horizonte, estableciendo por consiguiente un límite inferior al tiempo de reacción del sistema, factor importante al identificar y seguir un objetivo. Por otra parte, la detección, identificación y seguimiento de un objetivo los realizan operadores humanos hasta que el sistema se fija sobre el objetivo, lo que hace difícil enfrentarse a objetivos múltiples que vuelen a velocidades supersónicas. De hecho, en un reciente estudio del Congreso norteamericano, se calificó el tiempo de reacción y la potencia de fuego del sistema Tartar de "inadecuados", insistiendo en la "considerable degradación" que sufren frente a refinadas contramedidas electrónicas. Se apreció también una grave falta de coordinación del control de fuego dentro de un grupo de intervención. Podía darse el caso de que varios sistemas tipo Tartar se fijaran sobre un mismo mi-

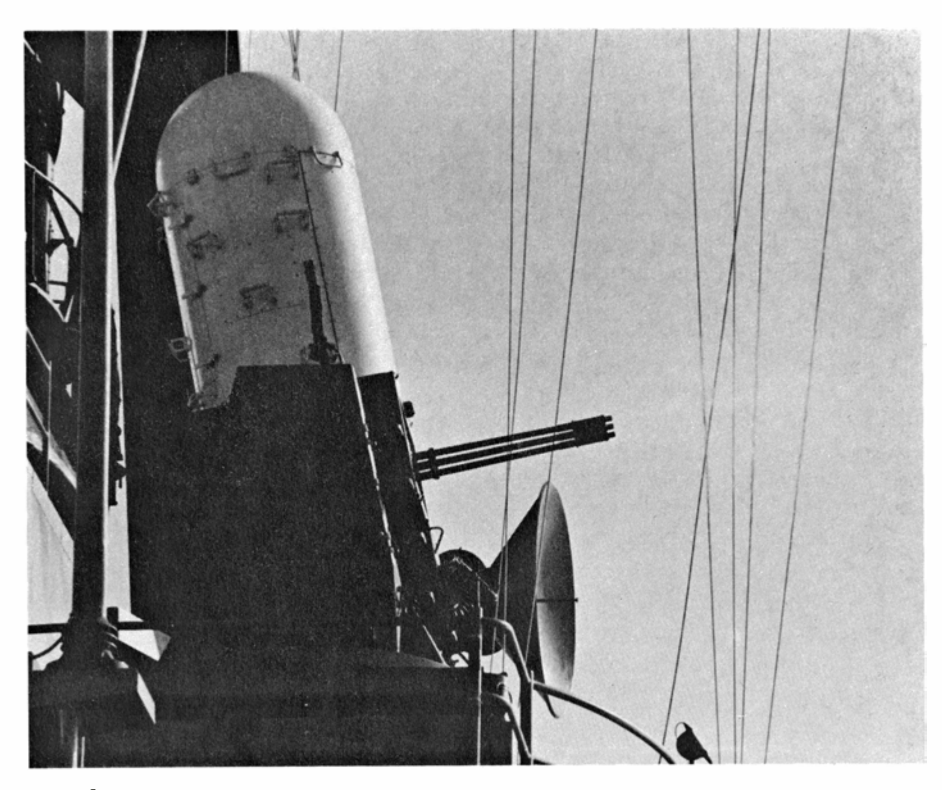


5. DISPARO DE ENSAYO del nuevo misil superficie-aire denominado Standard 2 desde un lanzador de tipo rail instalado sobre la cubierta del crucero portamisiles norteamericano *Wainwright*. Se prevé que los misiles Standard 1 y Standard 2 remplacen a los misiles Tartar y Terrier como misiles antiaéreos básicos de medio y largo alcance de la flota de los Estados Unidos. Se situarían en la segunda zona de defensa.

sil agresor, permitiendo que otras armas atravesaran la zona de defensa intermedia.

El sistema de control Aegis resuelve algunas de esas dificultades operativas. El misil Standard 2 le proporciona mayor potencia de fuego; su radar de exploración de múltiples haces (que apunta el haz electrónicamente, en vez de mecánicamente) barre el horizonte en tan sólo un segundo; está totalmente automatizado y coordina mejor el control de fuego dentro del grupo de intervención. Según se ha expresado, el sistema Aegis carece también de capacidad de interceptar misiles que vuelen a ras de las olas, como el Exocet. Se ha diseñado, fundamentalmente, para protegerse a sí mismo y a cualquier buque que, con relación al misil atacante, se halle detrás de él. Por consiguiente, en términos operativos, el Aegis puede enfrentarse con múltiples amenazas, pero sólo dentro de un sector limitado; si los misiles atacantes llegaran simultáneamente desde diversas direcciones, en fuego cruzado, la penetración estaría poco menos que asegurada.

Esto cede a la zona interior, de defensa puntual, la tarea de elegir y destruir (o al menos desviar) los misiles y aviones restantes. Las exigencias son aquí mucho más estrechas: ante un misil que llegue a la velocidad del sonido (Mach 1) no puede demorarse la reacción más allá de 30 segundos. Contra el misil que se aproxima puede dispararse un misil antimisil, como el Sea Sparrow de la OTAN, o un cañón automático de alta cadencia, como el Phalanx. Pero uno y otro presentan sus propias exigencias. El misil Sea Sparrow se dispara desde un lanzador montado en cubierta que contiene solamente ocho misiles, y por consiguiente puede caer arrollado. El Phalanx tiene una cadencia de tiro impresionante (3000 disparos por minuto), pero su depósito de municiones alberga sólo 989 proyectiles, que se agotan en menos de 20 segundos de fuego a cadencia máxima. También puede saturarse. Por último, las contramedidas pasivas que pretenden "despistar" al misil, en vez de destruirlo, pueden ser eficaces en ciertas circunstancias, pero no en otras, como demuestra la experiencia del Atlántico Sur.



6. CAÑON ANTIMISIL PHALANX. Es el primer cañón totalmente automático para defensa puntual, en todo tiempo, de la armada estadounidense. El cañón, de tipo Gatling, con seis tubos de 20 milímetros, dispara proyectiles con núcleo de uranio empobrecido a alta velocidad a una cadencia de 50 disparos por segundo. No obstante, presenta ciertas limitaciones operativas; su depósito de municiones contiene sólo 989 disparos, lo que únicamente permite hacer fuego a cadencia máxima durante menos de 20 segundos; sus tubos se inutilizan por desgaste a los siete minutos de fuego a cadencia máxima y el arma queda inutilizada tras 50 minutos de fuego. Es poco adecuada para responder, a la vez, a varios objetivos.

El último recurso de un buque es encajar el impacto de un misil, como hizo el *Sheffield*, y controlar el daño, lo que el *Sheffield* no logró. Los ingenieros navales ponen su atención en los sistemas de control de daños, que permitan a un buque sobrevivir a un primer impacto y, a ser posible, continuar las operaciones. La marina norteamericana sostiene que sus buques se han proyectado para soportar varios impactos antes de retirarse de la línea de fuego. Los cascos de la mayoría de los grandes buques de guerra están divididos en compartimentos y fuertemente blindados con planchas de acero; las superestructuras, aunque se construyen a menudo de materiales ligeros, como el aluminio, se recubren en los navíos más modernos con una capa de Kevlar, un blindaje protector constituido por una resina rígida. El espesor del blindaje de acero del acorazado norteamericano *New Jersey*, devuelto al servicio activo recientemente, es en muchos lugares de más de 30 centímetros; es dudoso que un misil Exocet pudiese penetrar gran trecho en tal blindaje.

Sin embargo, la historia de la guerra naval está repleta de incidentes en los que acciones hostiles de aparente insignificancia o accidentes fortuitos a bordo pusieron fuera de servicio a buques de guerra. El almirante alemán Alfred Von Tirpitz señalaba en cierta ocasión que tres eran los objetivos de todo buque de guerra: primero, mantenerse a flote; segundo, mantenerse a flote y tercero, mantenerse a flote. Los grandes buques de guerra modernos lo logran después de recibir el impacto de un arma inteligente, o incluso de varias; lo de continuar las operaciones con normalidad es ya otra cuestión. Los estados mayores de la armada admiten que, en una guerra moderna, los grandes buques de guerra permanecerán fuera de la línea de fuego hasta que el enemigo haya sido neutralizado, muy probablemente por acción aérea.

La vulnerabilidad de la flota norteamericana se hace más evidente cuando se considera la amenaza potencial máxima a que se enfrenta: no a media docena de misiles Exocet disparados desde unos pocos aviones Super Étendard, sino a la flota rusa, con más de 700 buques de superficie (limitados principalmente a fragatas, corbetas y barcos de vigilancia costera), casi 300 submarinos (la mayoría con propulsión diesel) y más de 1500 misiles crucero antibuque. Los misiles, con base en barcos de superficie, submarinos, aviones y baterías de costa, tienen alcances de 560 kilómetros y velocidades de hasta 4 Mach. El cañón Phalanx, proyectado para detener un misil en el kilómetro final de su vuelo, dispondría de poco más de un segundo para abatirlo cuando se apro-

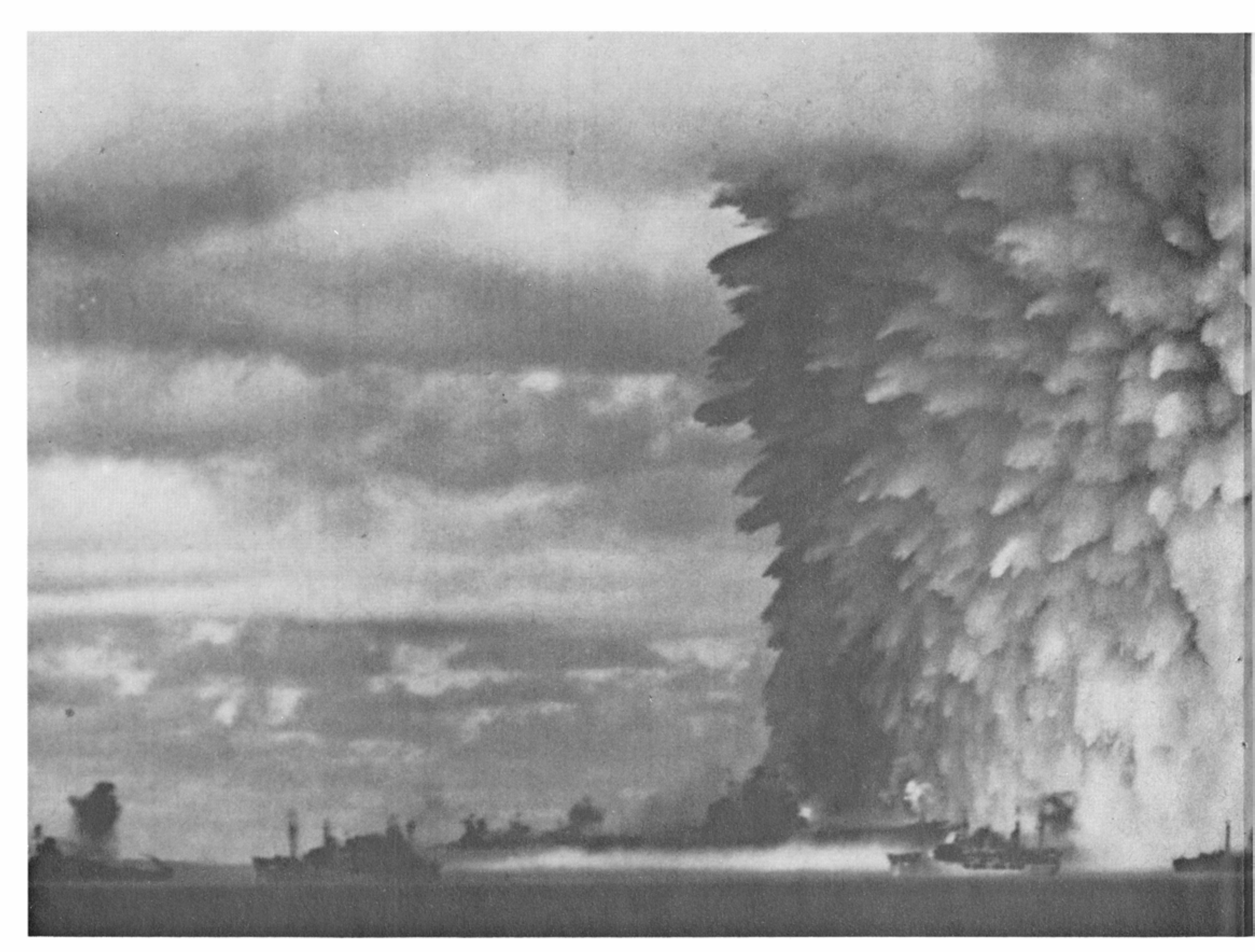
ximara a 4 Mach de velocidad. Aunque no cabe encontrar muchos de esos misiles fuera de las zonas costeras de la Unión Soviética algunos aviones rusos de mayor autonomía, como los bombarderos Backfire, pueden extender la amenaza hasta blancos más distantes.

Las armas nucleares constituyen otro factor crítico en cualquier valoración de la vulnerabilidad de la flota de superficie americana. La mayoría de los misiles antibuque de los arsenales rusos transportan ojivas nucleares o convencionales (no nucleares). Ningún buque sobrevivirá a una explosión nuclear en sus proximidades, no importa cuál sea su tamaño o blindaje.

En resumen, la aparición de los misiles inteligentes, con o sin ojiva nuclear, ha obligado a primar, en la guerrra naval, la cautela, el engaño, la movilidad y la dispersión, a costa del tamaño, el blindaje o la potencia de fuego coordinada de la defensa. Sin duda la ventaja tecnológica continuará alternando de algún modo entre el ataque y la defensa, como ha sucedido en el pasado. Los misiles antibuque serán más precisos, más dúctiles, de mayor alcance, más rápidos e insidiosos, y lo mismo sucederá con los misiles de la defensa. Al mismo tiempo, los buques de guerra irán transformándose en plataformas más eficaces, con mejores radares y sistemas de control de fuego, cañones de tiro rápido, misiles antimisiles y contramedidas pasivas. Sin embargo, a largo plazo, podrá prescindirse paulatinamente de los navíos de superficie.

Esta conclusión nos lleva a poner en entredicho la actual estrategia naval de los Estados Unidos. Se pretende mantener una supremacía marítima basada en los grandes portaviones de cubierta larga. El secretario de Marina Lehman explica al respecto: “Los portaviones son la única manera de conseguir la superioridad sobre siete décimas partes de la superficie terrestre”. También el secretario de Defensa, Caspar W. Weinberger,argumenta que la guerra de las Malvinas refuerza la necesidad de disponer de más portaviones, y que, en todo caso, no enseña ninguna lección desconocida.

Quizá las enseñanzas no sean nuevas, pero sí sirven de advertencia. Los buques de guerra de gran tamaño corren cada vez mayor peligro, con independencia del armamento con que cuenten, frente al ataque de torpedos y misiles inteligentes, más baratos en comparación. Para que un grupo de intervención con portaeronaves sea eficaz frente a un adversario bien dotado,



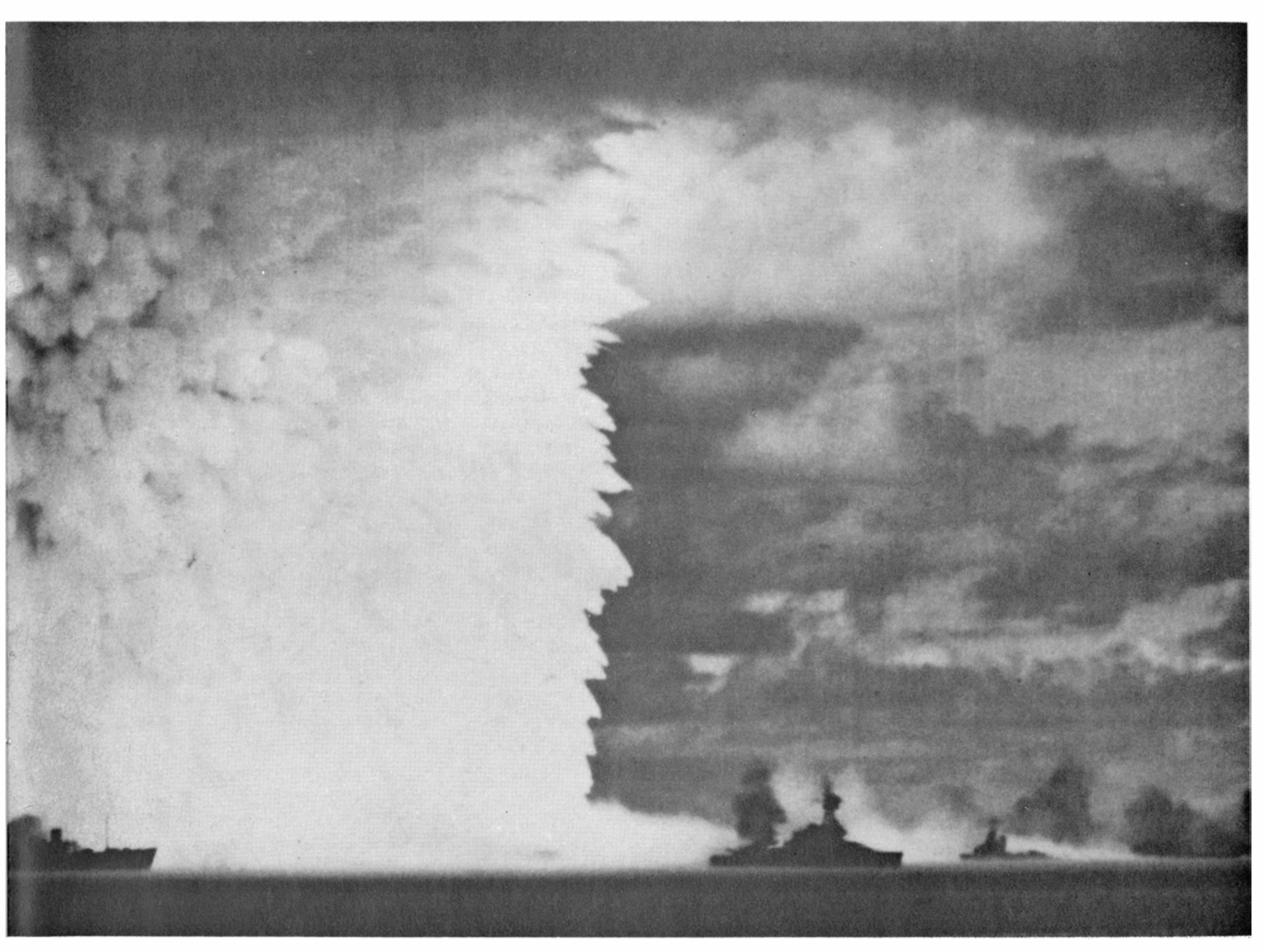
7. ARMA ANTIBUQUE DEFINITIVA, disponible actualmente en los arsenales de los Estados Unidos y la Unión Soviética para su posible utilización contra las fuerzas navales adversarias. Se trata de la ojiva nuclear de largo alcance y con guía de precisión. Esta fotografía de la explosión experimental de Baker, detonada por los Estados Unidos en el atolón de Bikini en 1946, da idea de los efectos de tal ataque hipotético. Se anclaron unos 70 buques de diversos tipos sin tripulación alrededor del punto de explosión, situado bajo la superficie del agua y a escasa profundidad; la potencia de la explosión fue de

como la Unión Soviética, hay que presumir que (1) la flota permanecerá oculta; (2) se destruirán todos los misiles y aviones atacantes y (3) no se emplearán ojivas nucleares. Dada la eficacia creciente del reconocimiento aéreo y por satélite, la permeabilidad de las defensas de las flotas y el fuerte apoyo de los rusos en las armas nucleares, según sus planes militares, ninguno de esos supuestos parece plausible.

Por ende, puede suceder que la propia armada estadounidense considere su flota un despilfarro. El almirante en la reserva Hyman G. Rickover, "padre" de los navíos con propulsión nuclear, testificaba el pasado año ante una comisión del Congreso que, en un conflicto generalizado, un moderno portaviones duraría "aproximadamente un par de días". Los jefes de la Junta de Estado Mayor bosquejan la necesidad de 25 de tales portaeronaves, para "riesgos mínimos"; ese número, o uno mayor, sólo bastaría para evitar el desgaste en un conflicto generalizado. Con todo, un nuevo portaviones de 90.000 toneladas, cuya construcción puede costar 3500 millones de dólares (en dólares de 1982) y otros 15.000 millones de dólares para los pertrechos y mantenimiento, y que tiene una tripulación de más de 6000 hombres, no es cosa baladí.

A la vez que satisfacen el objetivo previsto de "controlar los mares" y "proyectar potencia", los grupos de intervención basados en portaviones se han previsto para intervenciones en lugares remotos. Sin embargo, a medida que las modernas técnicas antibuque se extiendan al Tercer Mundo, incluso las pequeñas naciones representarán una seria amenaza para los grandes navíos de superficie de las potencias más importantes.

Quizá la lección final de la guerra de las Malvinas sea que, si volviera a desencadenarse, sería aún más costosa. Los días de la "diplomacia de la cañonera" han pasado, por mucho que algunas de las grandes potencias se resistan a reconocerlo. Los hábitos militares cambian lentamente. Pero, a la larga, se dará paso al reconocimiento de que el combate naval se librará con misiles y aviones (con base en tierra), barcos pequeños (dúctiles, rápidos y de fácil sustitución, armados de misiles con guía de precisión y largo alcance) y submarinos. Portaviones, acorazados puestos de nuevo en servicio y demás grandes –y costosos– buques de superficie mantendrán un cometido seguro: ostentar la enseña en aguas pacíficas.



unos 20 kilotones (pequeña para las posibilidades actuales). Los buques sufrieron daños por diversas causas, entre otras, ondas de choque aéreas y submarinas, así como olas de las aguas superficiales. El portaviones *Saratoga*, por ejemplo, anclado a unos 350 metros del "punto cero", quedó con la parte central de la estructura de su puente plegada sobre la cubierta a causa de una ola de 30 metros generada por la explosión. Por supuesto, los efectos de la radiación sobre la tripulación, en caso de un ataque como el indicado, superarían en mucho los efectos destructivos inmediatos sufridos por los buques.

Vibraciones del núcleo atómico

El núcleo puede temblar, resonar e incluso "respirar". A partir de ese movimiento coordinado de las partículas conocemos las fuerzas que median entre ellas. Se han detectado seis modos de vibración

George F. Bertsch

Los sistemas vibrantes, del péndulo al campo electromagnético oscilante de una onda luminosa, ocupan desde hace tiempo un lugar privilegiado en las ciencias físicas. Los modos y las frecuencias vibracionales observados en un sistema nos desvelan muchas características sobre la naturaleza de las fuerzas que actúan en su interior. El análisis de los movimientos vibracionales tuvo un papel destacado en la comprensión de la estructura atómica durante los primeros años del siglo xx. Más recientemente, se ha descubierto un espectro muy variado de vibraciones, de una escala mucho menor, en el núcleo del átomo. El estudio de esas vibraciones nucleares se está revelando como una importante fuente de información sobre la estructura del núcleo y las fuerzas que lo cohesionan.

Los protones y los neutrones que forman un núcleo reciben el nombre colectivo de nucleones. La mecánica cuántica explica la disposición y el movimiento de los nucleones mediante una función de onda. En el caso de los núcleos estables que se encuentran en la naturaleza, la función de onda no cambia con el paso del tiempo. Sin embargo, el núcleo puede ser puesto en movimiento por fuerzas externas que lo dejan internamente excitado. En las excitaciones más sencillas, llamadas vibraciones o resonancias gigantes, todos los nucleones oscilan coherentemente y el movimiento sigue una configuración sencilla. La diferencia entre movimiento coherente e incoherente en un núcleo excitado recuerda bastante la diferencia que hallamos entre el movimiento coherente de un líquido en una taza de té, a la que se ha dado un golpe, y el movimiento térmico aleatorio de las moléculas del té caliente. En toda vibración coherente se desarrolla un esquema o patrón de comportamiento: como el líquido que oscila en la taza, los nucleones de un núcleo en vibración pasan cíclicamente de una distribución a otra.

El movimiento de las distintas partículas en un cuerpo vibrante puede coordinarse de varias maneras, dando lugar a los esquemas característicos del movimiento que se conocen por modos vibracionales. Las moléculas de una taza de té pueden oscilar desde la pared de la taza hasta el centro y viceversa, o de un lado a otro de la taza; los nucleones pueden seguir también varios patrones de oscilación.

Se han observado ya hasta seis modos vibracionales nucleares gigantes. La mayoría de ellos se han detectado por vía experimental a lo largo de los últimos años. Los modos vibracionales gigantes son de dos clases. La primera clase contiene los modos que el núcleo comparte con otros cuerpos esféricos, una gota de agua o la propia Tierra, por ejemplo. Los modos de vibración esféricos del núcleo que se han observado son, por orden de su descubrimiento, el dipolar gigante, el cuadrupolar gigante, el monopolar gigante y el octupolar gigante. La terminología se ha tomado prestada de los nombres de los campos eléctricos que poseen una determinada complejidad espacial. Así, los protones de un núcleo que vibra en el modo cuadrupolar crean un campo eléctrico oscilante que se parece al generado por cuatro polos o cargas puntuales.

La segunda clase de vibraciones nucleares implica la orientación del espín de los nucleones. Los protones y los neutrones, como los electrones y otras muchas partículas, giran sobre un eje interno. En el núcleo sin excitar, el eje de giro está fijo con respecto a la función de onda del nucleón y la orientación del espín de los otros nucleones. Durante una vibración de espín, algunos espines de los nucleones se inclinan ligeramente y los ejes de espín empiezan a precesar, es decir, describen círculos en torno a su orientación original. La precesión de los neutrones con respecto a los protones puede coordinarse de diferentes maneras, dando lugar a distintos modos de vibración de espín. Por ejemplo, los espines de los neutrones pueden inclinarse en la misma dirección que los espines de los protones o en dirección opuesta. Como resultado de la precesión coordinada de los nucleones, el núcleo adquiere un cierto espín resultante o un momento magnético resultante que oscila a la frecuencia de precesión. Hasta ahora se han observado dos vibraciones de esta clase: se trata de la resonancia gigante de Gamow-Teller y la resonancia gigante dipolar magnética.

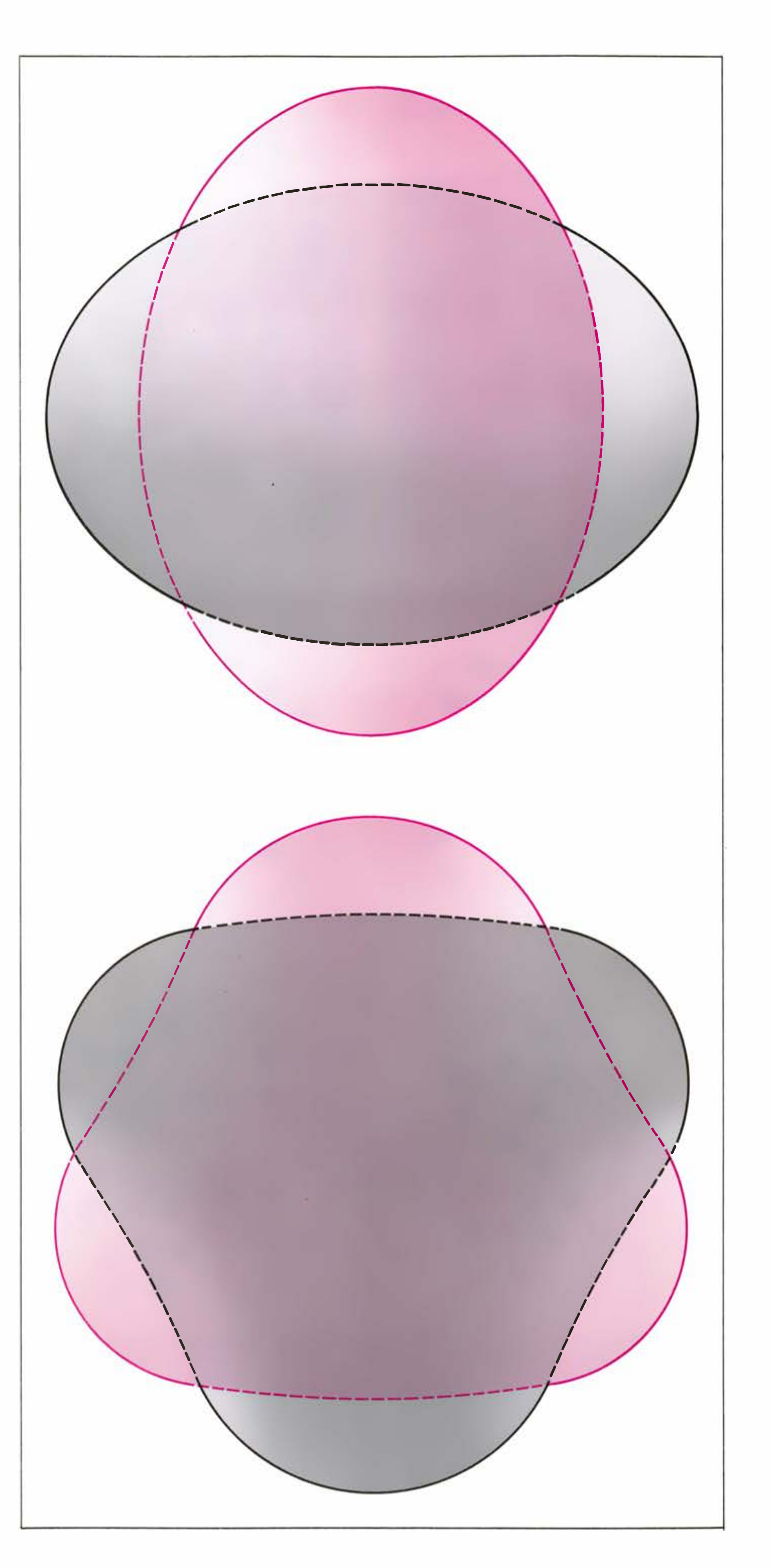
Para conocer las vibraciones nucleares hay que desentrañar qué fuerzas actúan entre los nucleones y qué leyes mecánicas gobiernan el movimiento de los nucleones bajo la influencia de estas fuerzas. Dada la complejidad del problema en el sistema de muchos cuerpos que es el núcleo, los físicos suelen recurrir a modelos sencillos. Se representan los nucleones moviéndose bajo la influencia de una única fuerza generalizada cuyos efectos se aproximan a los de las interacciones que median entre los numerosos nucleones. Los modos vibracionales del núcleo proporcionan una comprobación experimental de la validez de los modelos; una justificación teórica exige la teoría cuántica, más fundamental.

Todo cuerpo que vibre en cierto modo oscilará a una frecuencia específica, la llamada frecuencia de resonancia. Esta se determina en parte por las fuerzas internas que se oponen al movimiento de las partículas oscilantes. Una gota de agua y una esfera sólida vibrando en el mismo modo esférico presentan distintas frecuencias de resonancia. El sólido se opone fuertemente a cualquier distorsión y posee una alta frecuencia vibracional. Por otro lado, la

gota líquida recupera la forma esférica gracias a las fuerzas asociadas a la tensión superficial. Estas fuerzas, bastante débiles, conducen a una frecuencia vibracional baja.

Un modelo del núcleo, el de la gota líquida, compara las fuerzas que actúan entre los nucleones con las que intervienen entre las moléculas de un líquido de baja viscosidad. Otro modelo, basado en el modelo de capas del núcleo, compara las fuerzas con las que existen entre las partículas de un sólido elástico. Las frecuencias de resonancia de los modos de vibración nucleares se calcularon a partir del modelo de la gota líquida y de otros modelos sencillos, mucho antes de que las vibraciones pudieran provocarse en los laboratorios y medirse sus frecuencias. Ningún modelo predice con precisión las frecuencias de resonancia de todos los modos de vibración. En determinadas circunstancias, el núcleo se comporta como un líquido; en otras, como un sólido elástico. En general, podríamos asociar su respuesta al de cierta clase de fluidos no newtonianos cuyo ejemplo más familiar sería el "Silly Putty" ("cemento absurdo"). Estas sustancias responden elásticamente ante fuerzas repentinas, pero fluyen a modo de líquidos si las fuerzas persisten durante períodos de tiempo más dilatados.

La descripción más ajustada y técnica de las vibraciones nucleares viene dada por la teoría del campo medio dependiente del tiempo, que se basa en la mecánica cuántica. En la teoría del campo medio, las fuerzas que actúan sobre las partículas nucleares se calculan a partir del movimiento mecánico-cuántico de las propias partículas, mientras que los modelos más simples se fundan en hipótesis específicas sobre la relación entre las fuerzas y el movimiento de las partículas. A primera vista, diríase que estas aproximaciones son divergentes, pero el movimiento de



1. VIBRACIONES de la forma nuclear en las que el núcleo se deforma desde una configuración esférica hasta otra elipsoidal o en pera; son similares a las vibraciones de un cuerpo macroscópico, la de una gota de agua por ejemplo. En ambos casos, la vibración consiste en una oscilación coherente de las partículas que componen el cuerpo y, por tanto, da lugar a un patrón de movimiento del cuerpo entero. Las vibraciones han desempeñado un papel importante a la hora de someter a prueba modelos de estructura nuclear. Los esquemas difieren en sus predicciones de la frecuencia y demás características de los modos de vibración del núcleo de cada átomo. Parece que el núcleo actúa unas veces como un sólido elástico, otras veces como un líquido y aún otras se comporta como una masilla especial llamada Silly Putty, o "cemento absurdo".

las vibraciones es sencillo y en muchos casos la teoría cuántica demuestra que las hipótesis hechas en los modelos simples están justificadas.

En general, las vibraciones nucleares se excitan bombardeando núcleos con fotones (cuantos de radiación electromagnética) de alta energía u otras partículas. Y se detectan observando la absorción, o difracción, del proyectil por parte de los núcleos. En el caso de la primera que se conoció, la vibración dipolar gigante, la excitación y la detección de la vibración resultaron ser relativamente sencillas. Para los otros modos, costó bastante más abordar el núcleo en la forma necesaria para excitar una determinada vibración. Lo cierto es que transcurrieron casi 30 años entre el descubrimiento de la vibración dipolar gigante y el descubrimiento de otro modo vibracional gigante.

Para explicar una vibración nuclear, la primera condición, y la más sencilla, que debe satisfacerse es que la energía suministrada al núcleo sea igual a la energía asociada con la vibración. El núcleo vibra a una frecuencia extremadamente alta; la energía de la vibración es igual a la frecuencia multiplicada por la constante de Planck, de manera que nos hallamos ante una energía bastante alta. Una frecuencia de vibración típica es 5×10^{21} hertz, que corresponde a una energía vibracional de 20 millones de electronvolt (MeV). La energía del fotón o de otra partícula que excite una vibración nuclear será por lo menos tan alta como la energía vibracional.

En el caso de la resonancia dipolar gigante, la exigencia de la energía era la única condición a cumplir. Los físicos lograron excitar la vibración dipolar gigante bombardeando los núcleos con fotones que tuvieran una energía igual a la energía vibracional del modo. El descubrimiento de la dipolar gigante dependía sólo de la disponibilidad de una fuente de fotones monoenergéticos de alta energía, o rayos gamma. La detección de la vibración siguió inmediatamente al desarrollo de tales fuentes (bremsstrahlung, o radiación de frenado, de los aceleradores de electrones) a mitad de la década de 1940.

No es difícil comprender cómo los rayos gamma excitan la vibración dipolar. El fotón lleva consigo un campo eléctrico oscilante. Aunque la longitud de onda de un rayo gamma sea menor que la de otras formas de radiación electromagnética, pensemos por ejemplo en la luz visible, es grande con respecto al diámetro de un núcleo. Resulta de ello que el campo eléctrico asociado al paso de un rayo gamma es casi uniforme sobre todo el núcleo. El campo ejerce una fuerza sobre los protones cargados positivamente, alejándolos de los neutrones. Por ser estos eléctricamente neutros, el campo no tiene una influencia directa sobre los mismos. Pero al permanecer en reposo el centro de masas del núcleo, los neutrones se mueven en la dirección opuesta. La fuerza recuperadora de la vibración es la fuerza atractiva entre los protones y los neutrones, es decir, la intensa fuerza nuclear responsable del enlace mutuo de las partículas. La fuerza fuerte es independiente de la carga eléctrica.

Fue tarea relativamente fácil excitar y detectar el dipolo gigante. Los fotones que excitan la vibración quedan absorbidos en el núcleo. Este fenómeno, que constituye una forma de resonancia, se desarrolla en cualquier sistema vibrante excitado por una fuente externa. Un ejemplo común de resonancia lo tenemos en el individuo que canta en la ducha. Cuando la frecuencia de la voz iguala una frecuencia de vibración natural de la masa de aire de la ducha, la amplitud de la vibración se hace muy grande. El sonido se intensifica; la pureza de la frecuencia se percibe en un tono resonante. En tales situaciones, la amplitud conduce a un incremento en la absorción de energía. Análogamente, cuando la frecuencia del campo eléctrico oscilante asociado con los rayos gamma se iguala a la frecuencia de resonancia del modo dipolar del núcleo, se absorben los rayos gamma.

La tendencia del núcleo a absorber partículas incidentes se expresa cuantitativamente como una sección eficaz efectiva, medida en unidades de superficie. La resonancia dipolar se aprecia como un aumento agudo en el ritmo de absorción del blanco a determinada

2. VIBRACION DIPOLAR GIGANTE, identificada a finales de la década de 1940; se excita bombardeando los núcleos de un blanco con fotones de alta energía. Los protones del núcleo (*color*) se aceleran en una dirección por el campo eléctrico asociado a un fotón que pasa. Los neutrones (*grises*) no son afectados por el campo, pero se mueven en la dirección opuesta a la de los protones, de suerte que el centro de masas del núcleo permanezca estacionario y se conserve el momento. La fuerza recuperadora, que acaba por invertir los movimientos de los protones y los neutrones, es la fuerza fuerte nuclear responsable de ligar los nucleones entre sí. La frecuencia de la vibración puede calcularse a partir de un modelo sencillo en el que se considera sólo la inercia de los nucleones, la fuerza recuperadora y las leyes de la mecánica clásica. La inercia del sistema es proporcional al número de nucleones y, por tanto, al volumen del núcleo. La fuerza recuperadora es proporcional tanto al volumen del núcleo como al desplazamiento de los nucleones. La dependencia de las variables respecto al volumen nuclear sugiere que la frecuencia de la vibración debe variar inversamente al radio del núcleo; los datos experimentales obtenidos a propósito de núcleos grandes lo confirman. La amplitud de la vibración se ha exagerado en aras de una mayor claridad.

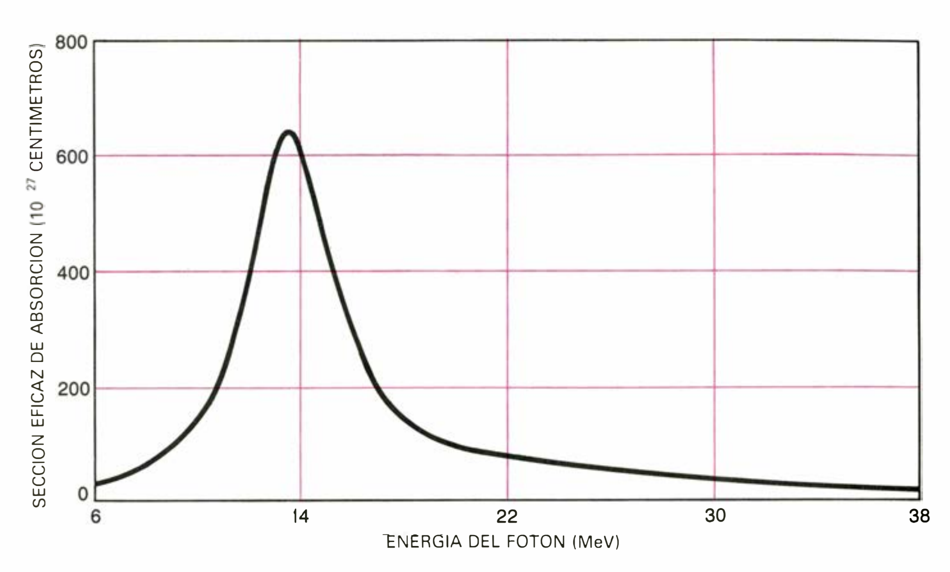
energía del fotón. Esto se expresa en un aumento de la sección eficaz efectiva de absorción del núcleo. Es como si, de repente, el núcleo se hiciese mayor e interceptara, por tanto, más fotones, aunque lo que cambie no sea el tamaño nuclear, sino la absorbencia. La respuesta de un cuerpo a una fuerza electromagnética depende de la carga eléctrica del cuerpo; significa ello que, a partir de la sección eficaz efectiva del núcleo vibrante, podemos determinar que todos los protones del núcleo participan en la vibración. Brevemente, la vibración dipolar es una vibración gigante.

Se descubrió luego la vibración cuadrupolar gigante. A diferencia del dipolo, el cuadrupolo es una vibración de forma, en la que cambian la forma del núcleo y la distribución de los nucleones. Un núcleo que vibre en el modo cuadrupolar trueca su forma esférica en otra elipsoidal y regresa, a través de la esférica, a otra forma elipsoidal de orientación distinta. Intuitivamente se ve que puede inducirse la vibración presionando sobre la superficie nuclear según un cierto eje y estirando a lo largo de un eje perpendicular.

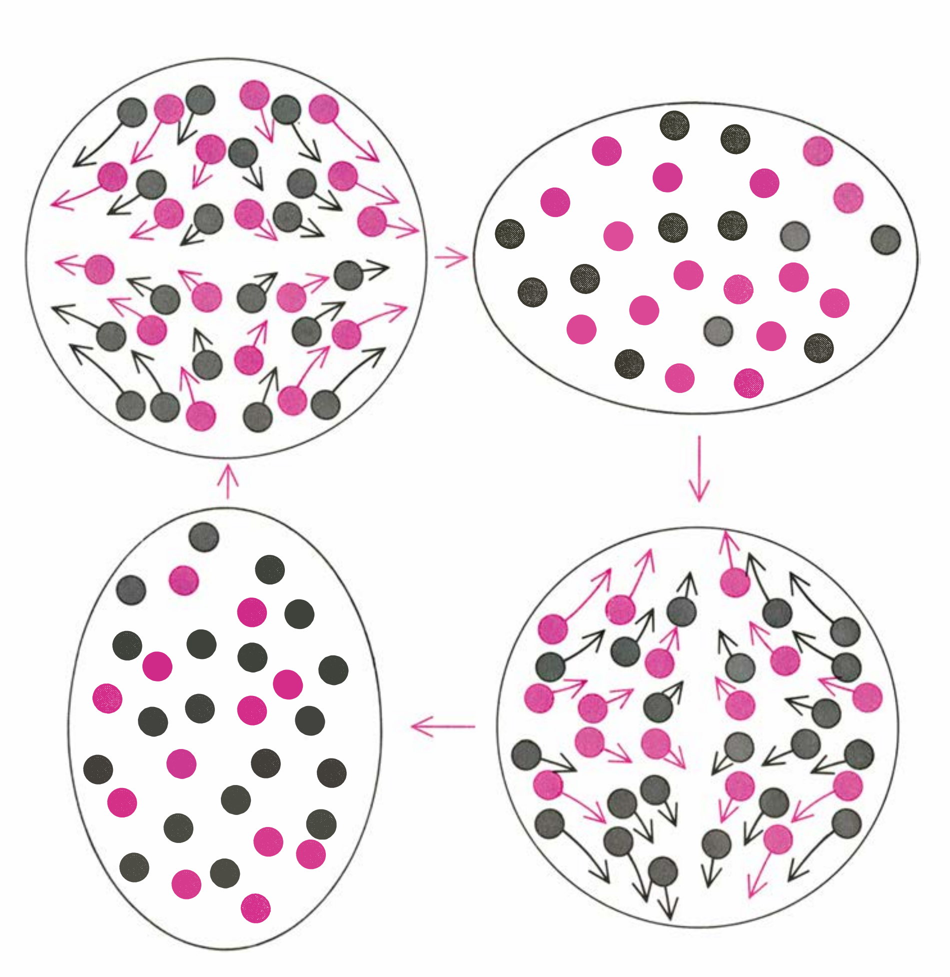
Para excitar vibraciones de forma hemos de impartir al núcleo cierta energía y distribuirla de suerte tal que los nucleones se pongan en movimiento en direcciones diferentes. Aun cuando la energía vibracional del modo cuadrupolar sea de 10 a 20 MeV, en el rango de energías de los rayos gamma, éstos no excitan el modo cuadrupolar porque no satisfacen la segunda condición. Los rayos gamma interaccionan con el núcleo a través de la fuerza electromagnética; sólo pueden acelerar a los protones y, dada la longitud de onda de los rayos gamma, los aceleran en un sentido exclusivamente.

Se soluciona el problema si excitamos la vibración mediante el choque inelástico de una partícula del núcleo, en vez de hacerlo a través de un proceso completo de absorción. En física clásica, una partícula que golpea un objeto extenso y se aleja puede causar un movimiento localizado y dejar vibrando el objeto. Un fenómeno similar sucede en un sistema mecánico-cuántico. Entre las partículas que sirven de proyectiles para inducir excitaciones nucleares se cuentan los electrones, los protones y las partículas nucleares más pesadas tales como las partículas alfa (núcleos atómicos de helio-4).

Hay varias razones para preferir proyectiles nucleares tales como los protones o partículas alfa a la hora de



3. PICO EN LA SECCION EFICAZ de absorción de los núcleos de plomo; constituye una prueba de que están vibrando en el modo dipolar. La sección eficaz es una medida de la fracción de fotones absorbidos por los núcleos. Crece drásticamente cuando la frecuencia del fotón coincide con la frecuencia vibracional de los núcleos, fenómeno conocido por absorción resonante. La resonancia en este núcleo aparece a una energía del fotón de 14×10^6 electronvolt (MeV), equivalente a una frecuencia de 3×10^{21} hertz.



4. SE EXCITA LA VIBRACION CUADRUPOLAR GIGANTE bombardeando núcleos con proyectiles que interaccionen con los protones y con los neutrones mediante la fuerza fuerte. La vibración cuadrupolar difiere, por consiguiente, de la dipolar en que los protones y neutrones se mueven juntos en vez de hacerlo en direcciones opuestas. Como en el caso del modo dipolar, la frecuencia vibracional se calcula a partir de la inercia del sistema, la fuerza recuperadora y las leyes de la mecánica clásica. De nuevo, la inercia es proporcional al volumen del núcleo; no resulta tan inmediato describir la fuerza recuperadora. Si ésta se supone análoga a la tensión superficial, como en una gota de agua vibrante, la fuerza será proporcional al área de la superficie del núcleo. Si la fuerza recuperadora se supone análoga a la energía elástica, o resistencia a la deformación, como en un sólido elástico vibrante, la fuerza será proporcional al volumen del núcleo. Los datos experimentales muestran que la frecuencia de la vibración cuadrupolar gigante varía inversamente al radio del núcleo, lo que favorece el modelo basado en un sólido elástico.

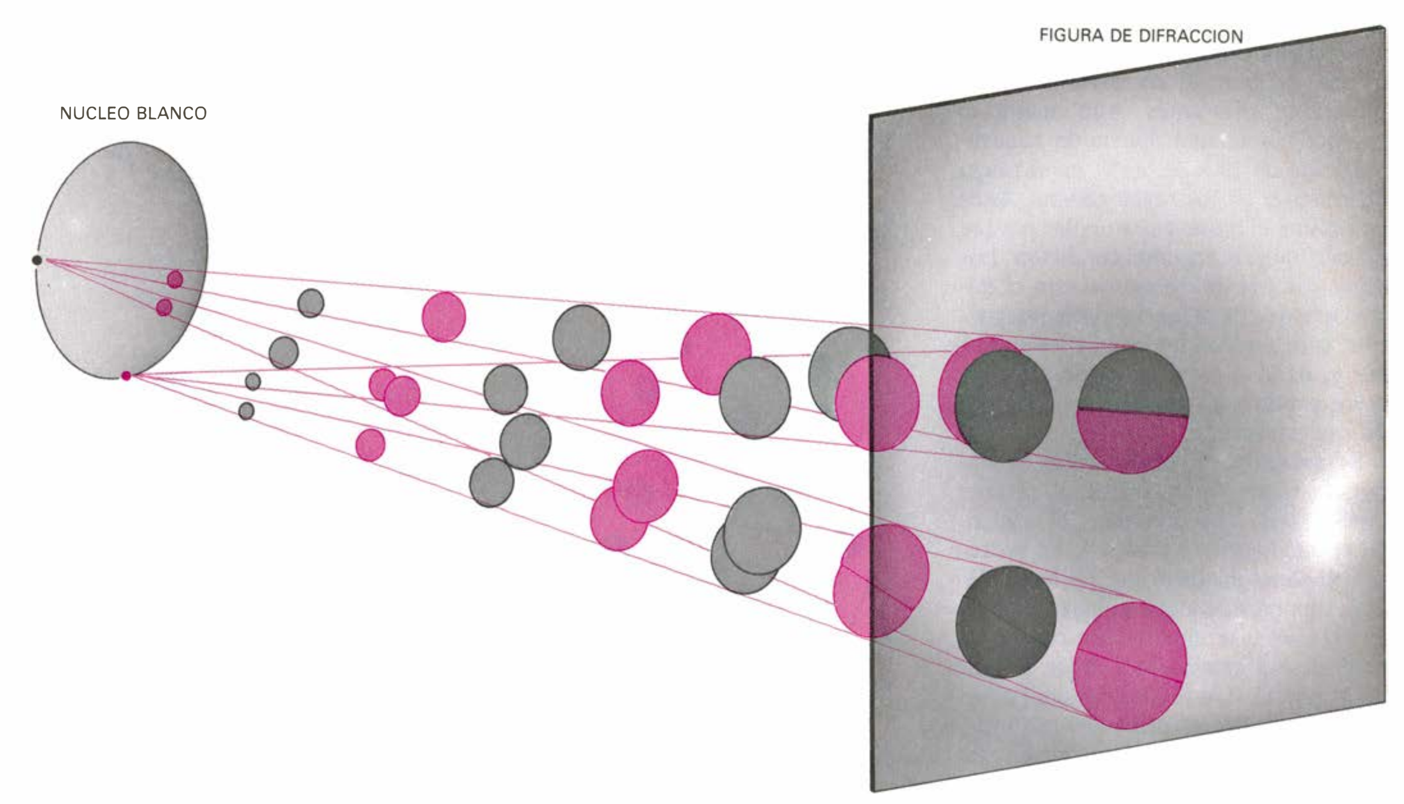
excitar el núcleo. La interacción principal en tales sucesos compete a la fuerza nuclear fuerte, que tiene simetría de carga, lo que significa que es la misma para protones y neutrones. La simetría de carga facilita la excitación de vibraciones tales como la cuadrupolar, en la que los protones y neutrones se mueven a la vez. Las vibraciones en que los protones se mueven de manera opuesta a los neutrones, así la dipolar, no se excitan en absoluto por fuerzas con simetría de carga. Para observar la vibración cuadrupolar sin interferencia del dipolo, conviene emplear proyectiles que interaccionen fuertemente, tales como las partículas alfa, en vez de electrones, que interaccionan con el campo eléctrico y pueden dar lugar a ambas clases de vibración.

Otra ventaja de los proyectiles nucleares: los distintos modos de deformación pueden excitarse selectivamente. Un protón rápido que atraviesa un núcleo transmite un impulso transitorio a los nucleones del blanco próximos, provocando su movimiento en la estela del proyectil. El alcance de la fuerza nuclear fuerte es pequeño, si lo comparamos con el tamaño de un núcleo; ello plantea la cuestión de cómo puede ponerse en movimiento una vibración coherente de todo el núcleo. Para entender cómo pueden seleccionarse vibraciones particulares mediante procesos de colisión hemos de acudir a una noción fundamental de la mecánica cuántica: el carácter ondulatorio de las partículas. Podemos representarnos un protón que atraviese un núcleo como una onda que envuelve a dicho núcleo; igual que cualquier otra onda, ésta se halla sujeta a las leyes de la difracción.

Según cómo interaccione con el núcleo, la onda se difractará de acuerdo con un diagrama característico. Así, una onda luminosa, que pase sobre una esfera negra, se difractará en la zona de sombra y formará una figura de anillos en el centro de la sombra. En el caso de proyectiles y blancos nucleares, la figura de difracción depende de varios factores. Si se pretende producir una figura de difracción nítida, la onda habrá de absorberse, necesariamente, en el interior del núcleo. En términos físicos, cuando el proyectil penetre en el núcleo, interaccionará con tal intensidad que ya no emergerá intacto. La posición de los anillos en la figura de difracción está determinada por el tamaño del núcleo, la longitud de onda del proyectil y el tipo de vibración que se ha excitado.

La interacción entre la onda y los nucleones de la superficie nuclear altera la forma de aquélla. Producida la interacción, cada región de la superficie nuclear se convertirá en origen de una pequeña onda que se dispersa. La fase de la ondita depende del movimiento de la superficie que la originó. Las que aparecieron en regiones superficiales que se movían hacia fuera tenían la misma fase o signo, mientras que las originadas en regiones superficiales que se movían hacia dentro mostraban la fase opuesta. Cuando las onditas se alejaban de la superficie nuclear, se superponían e interferían. El que la interferencia sea constructiva o destructiva en un punto dependerá de la fase de las distintas onditas en aquel punto.

Para hacernos una idea de la naturaleza de la figura de difracción, considérese un plano perpendicular al eje del haz y colocado una vez superado el blanco. Si la fase de la onda no se alterase en su paso cerca del núcleo, la fase de las pequeñas ondas que alcanzaran cierta posición sobre el plano quedaría enteramente determinada por la dis-



5. FIGURA DE DIFRACCION ANULAR formada cuando los núcleos del blanco dispersan los proyectiles; está asociada con la vibración cuadrupolar. En mecánica cuántica, la partícula proyectil vendría a ser una onda plana perturbada por su interacción con la superficie del núcleo. La interacción entre onda y nucleones es atractiva a lo largo de un eje (y así, la superficie nuclear es estirada hacia fuera) y repulsiva según un eje perpendicular (y así, la superficie es empujada hacia dentro). La onda plana única se difracta en muchas ondas circulares pequeñas que se propagan hacia fuera e interfieren entre sí. Las ondas originadas en las regiones que se deforman hacia dentro del núcleo están desfasadas en 180 grados con respecto a las de regiones que se deforman hacia fuera. La figura creada por la interferencia de las ondas está determinada por esa diferencia de fase. Las ondas llegan desfasadas a cualquier punto del eje del haz y se cancelan. Hay, sin embargo, puntos fuera del eje donde las ondas llegan en fase; se dice que interfieren constructivamente.

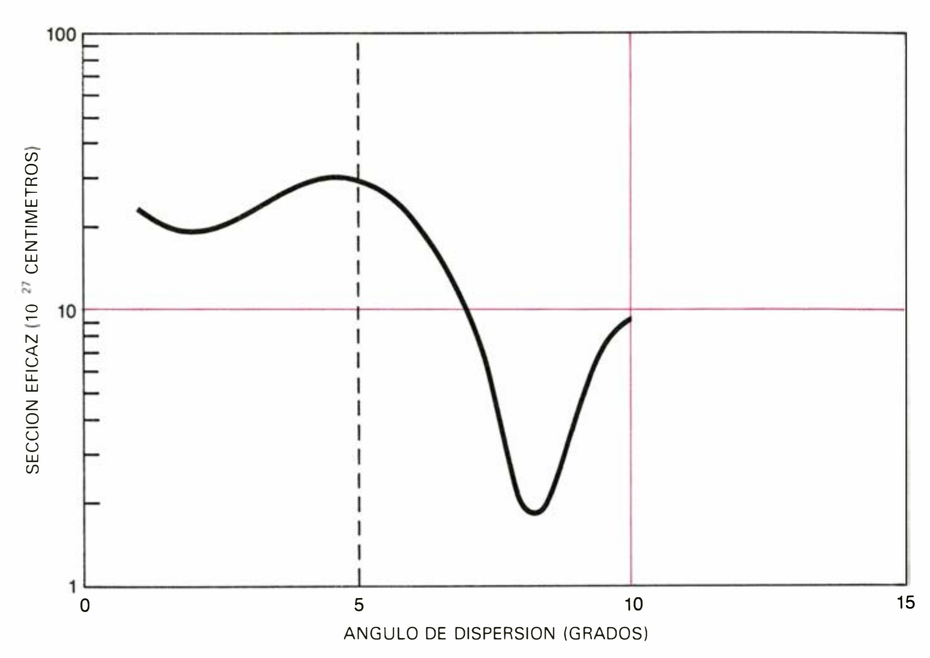
tancia que media desde el punto de difracción hasta dicha posición. Importa destacar que las onditas difractadas hacia el centro del plano constituido a lo largo del eje del haz en la sombra del núcleo habrían recorrido el mismo intervalo y llegarían en fase. La interferencia constructiva resultante crearía un punto brillante (una región de gran amplitud de onda) en el centro del plano.

Sin embargo, cuando la onda estimula una vibración cuadrupolar las fases no permanecen inalteradas. Antes bien, las onditas originadas en los lados crecientes del núcleo están inicialmente desfasadas en 180 grados con respecto a las onditas que se originan en los lados que se contraen. Debido a ello, la interferencia en el centro del plano es destructiva. Pero hay otros puntos del plano donde la distancia a una región que se expande y la distancia a una región que se contrae difieren exactamente en media longitud de onda. Las ondas llegan a estos puntos en fase, interfiriendo constructivamente. Puesto que los ejes de las regiones que se deforman hacia dentro y hacia fuera del núcleo pueden tener cualquier orientación, la máxima difracción se dirigirá hacia un anillo centrado en el eje del haz.

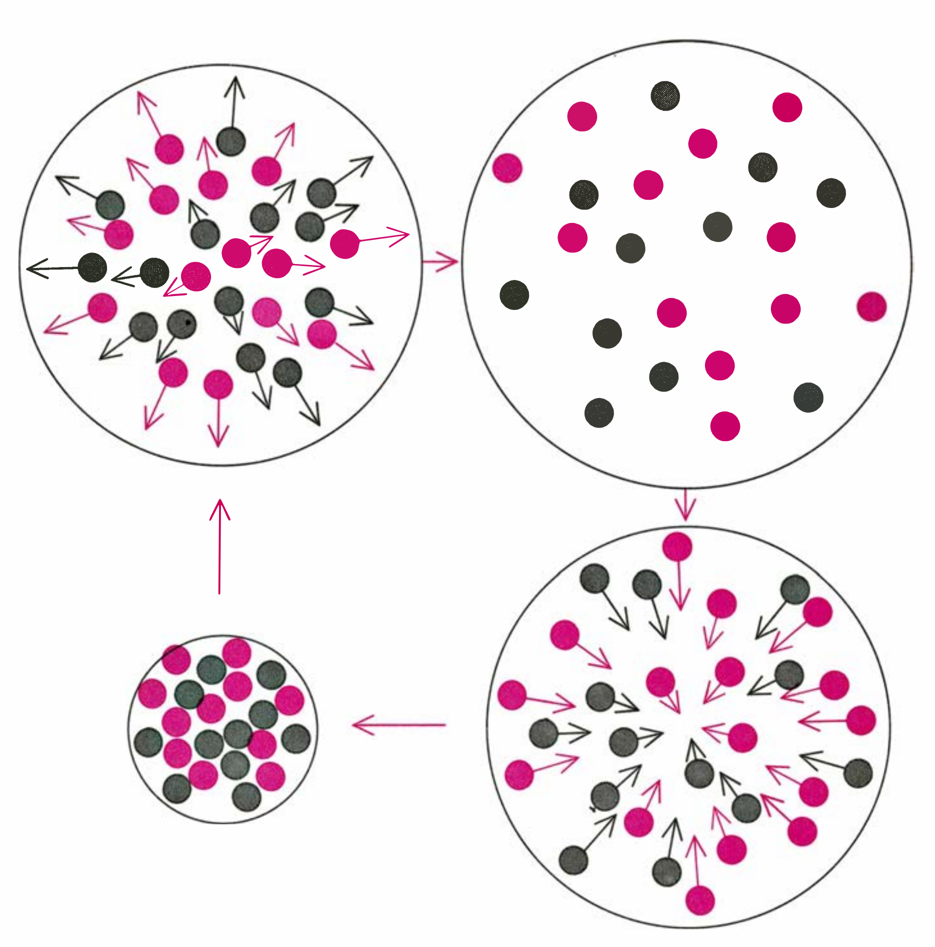
La amplitud de la función de onda de una partícula, que se halle en cualquier punto del espacio, determina la probabilidad de que la partícula se localice en dicho punto. En consecuencia, las partículas proyectiles se dispersarán, con preferencia, hacia regiones de interferencia constructiva, donde es máxima la amplitud de la función de onda.

Igual que la absorción, podemos medir el choque inelástico en función de una sección eficaz. En ausencia incluso de una resonancia vibracional, se dispersa inelásticamente cierta fracción de los proyectiles que bombardean un blanco; la fracción dispersada en cualquier dirección varía suavemente con el ángulo formado por el eje del haz y la dirección de la dispersión. La vibración cuadrupolar se manifiesta en un aumento agudo del número de partículas dispersadas inelásticamente hacia determinadas direcciones.

Para elaborar una predicción cuantitativa de la sección eficaz en función del ángulo de dispersión, la interacción entre onda y núcleo se describe dentro de un modelo óptico fenomenológico. A continuación se resuelve numéricamente la ecuación de onda a fin de encontrar la sección eficaz deseada. La sección eficaz para el modo cuadrupo-



6. PORCENTAJE DE PARTICULAS DISPERSADAS EN UN ANGULO DADO respecto al eje del haz; aumenta bruscamente cuando se excita la vibración cuadrupolar. La sección eficaz de colisión varía con el ángulo, de manera que reproduce la figura de difracción asociada al modo cuadrupolar. Las partículas dispersadas tienen una energía determinada, la energía del haz incidente menos la energía vibracional del modo cuadrupolar, exactamente. En este caso, los proyectiles eran partículas alfa con una energía de 96 MeV que incidían sobre un blanco formado por el isótopo samario 144. El modo cuadrupolar se excita, de un modo preferente, con un ángulo de colisión de cinco grados con respecto al eje del haz.



7. VIBRACION MONOPOLAR GIGANTE, conocida también por modo respirante, pues en ella el núcleo se expande y se contrae. En el modelo de la vibración monopolar gigante, basado en la mecánica clásica, la fuerza recuperadora es la resistencia de la materia nuclear a la compresión. La frecuencia de la vibración monopolar nos da un valor del coeficiente de compresibilidad de la materia nuclear.

lar alcanza su valor máximo en un ángulo que depende del tamaño del núcleo y de la longitud de onda del proyectil. Por ejemplo, en el caso del núcleo de plomo 208 bombardeado por partículas alfa de 100 MeV el principal máximo de difracción está a cinco grados del eje del haz.

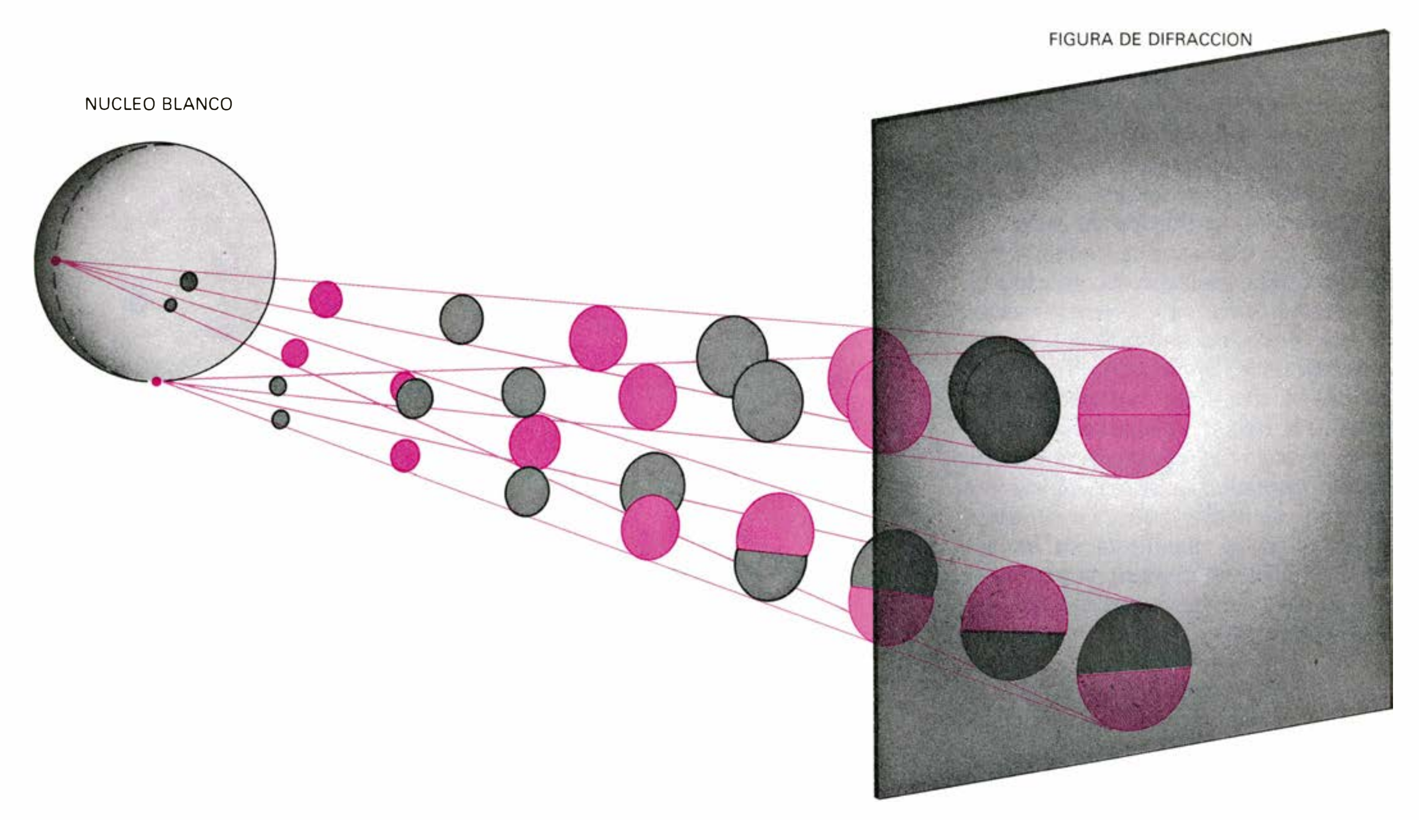
El tercer modo vibracional nuclear que se observó, la vibración monopolar gigante, se excita y se detecta de manera parecida a la cuadrupolar gigante. La vibración monopolar es un modo "respirante": los nucleones se mueven en fase hacia dentro y hacia fuera respecto al centro del núcleo, de manera que el núcleo se expande y se contrae. Intuitivamente parecería que el mejor modo de inducir este movimiento sería apretar de manera uniforme sobre la superficie de la esfera o, equivalentemente, estirar hacia fuera en una dirección radial.

Semejantes condiciones perfectas para excitar la vibración monopolar no pueden lograrse con la dispersión inelástica. Si el proyectil golpea el núcleo, pierde la mayor parte de su energía y deja el núcleo en un estado muy altamente excitado. Sólo cuando el proyectil roza la superficie del núcleo, la interacción es lo bastante suave para excitar el movimiento vibratorio. La parte de la superficie sobre la que actúa la onda del proyectil es una región en forma de anillo que rodea el eje del haz. Como en la excitación cuadrupolar, la interacción da lugar a muchas ondítas que se originan en cada porción de la superficie del núcleo. Las pequeñas ondas interfieren a medida que se van dispersando desde la superficie de la esfera. La excitación monopolar es completamente simétrica; las onditas partirán, pues, de la superficie curvada con la misma fase. Por tanto, a lo largo del eje del haz, donde la distancia a todas las áreas de la periferia de la esfera es igual, las onditas llegan en fase e interfieren constructivamente.

La figura de difracción que forman las partículas que excitan la vibración monopolar es un punto predominante centrado en el eje del haz, rodeado por débiles anillos. En otras palabras, la vibración monopolar se caracteriza por un máximo en la sección eficaz de colisión a cero grados del eje del haz. La figura semeja la formada por partículas difractadas por un núcleo no vibrante. Por esta misma razón, resultó más difícil detectar la vibración monopolar que la cuadrupolar; costó mucho separar las partículas dispersadas inelásticamente a lo largo del eje central del haz de aquellas otras que atraviesan el blanco sin interaccionar con el núcleo. Para discriminar entre partículas dispersadas inelásticamente y partículas del haz no queda más remedio que medir la dependencia energética de la dispersión inelástica.

Ahora podemos volver ya a la cuestión sobre la demora a la hora de obtener pruebas experimentales sobre las vibraciones monopolar y cuadrupolar. Años antes de que se apreciaran en el laboratorio las vibraciones, se habían avanzado predicciones aproximadas sobre las frecuencias vibracionales de estos modos a partir de modelos teóricos del núcleo. Los físicos experimentales sabían por dónde buscar y qué poder ver. Les faltaban instrumentos de suficiente potencia y sensibilidad, en combinación con aceleradores que proporcionaran proyectiles de suficiente energía.

Aun cuando la energía vibracional de los modos cuadrupolar y monopolar estén en el rango de 10 a 25 MeV, la energía del proyectil deberá ser varias veces más elevada. La velocidad del proyectil es un dato importante para juzgar su idoneidad como sonda vibra-

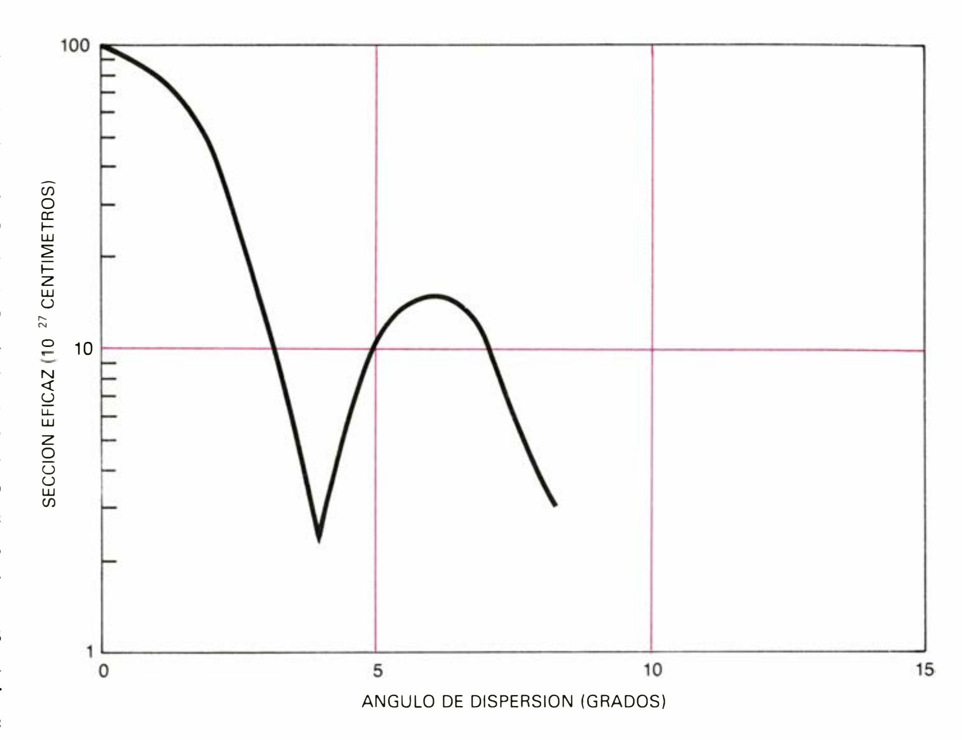


8. FIGURA DE DIFRACCION asociada a la vibración monopolar; es un punto en el eje del haz. La figura se conoce por mancha de Poisson; en el siglo XIX, Siméon Denis Poisson justificó matemáticamente que si la luz fuera un fenómeno ondulatorio habría un punto brillante en la sombra de una esfera. Poisson presentó su argumento como una demostración de que luz no podía tener una naturaleza ondulatoria, porque en su tiempo no se había visto ninguna figura de difracción de ésas. La figura se forma mediante un disco o una esfera cuya superficie absorbe la luz uniformemente. Las partículas que interaccionan uniformemente con la superficie de un núcleo, tal como lo hacen las que excitan la vibración monopolar, se difractan con la misma mancha.

cional. La velocidad de una partícula de una masa determinada depende de su energía. Para excitar vibraciones gigantes se requieren proyectiles de alta energía, porque los de baja energía (y, por tanto, de baja velocidad) interaccionan con el blanco durante un tiempo relativamente largo, permitiendo que se desarrollen procesos de excitación más complejos. Un proyectil más lento puede inducir una vibración compuesta de varios modos fundamentales, o inducir movimientos más complicados en el núcleo por intercambio de nucleones con el blanco. Estos procesos no producen ninguna figura de difracción, sino que contribuyen a la sección eficaz de fondo que debe restarse de los datos antes de que se analicen los modos vibracionales.

Hay otra razón más para exigir los proyectiles de alta energía. Sólo en el caso de que la longitud de onda, y por tanto la energía, del proyectil excitante no cambie significativamente durante el proceso de excitación, se obtendrán figuras de difracción simples. El proyectil que excita una vibración nuclear cede una cantidad de energía igual a la energía del modo de vibración; cuanto más alta sea la energía inicial del proyectil, tanto menos relevante será el cambio en la longitud de onda. Desde el punto de vista experimental, un cambio pequeño en la energía convierte en tarea difícil distinguir las partículas difractadas de las partículas del haz, mucho más numerosas, que no interaccionan con el núcleo blanco.

El descubrimiento de las vibraciones cuadrupolares y monopolares en la década de 1970 se apoyó en el desarrollo de dos clases de instrumentos científicos: máquinas capaces de acelerar partículas de varias clases a energías por encima de los 50 MeV y espectrómetros magnéticos sensibles (espectrógrafos) capaces de separar partículas de energías ligeramente distintas. Una vez los instrumentos estuvieron listos, las vibraciones nucleares empezaron a ofrecerse en rápida sucesión. La vibración cuadrupolar gigante se vio por primera vez en mediciones de colisión de electrones realizadas en Darmstadt, Alemana Federal, por Rainer Pitthan y Th. Walcher y en medidas de colisiones de protones realizadas en el Oak Ridge National Laboratory por F. E. Bertrand y M. B. Lewis. En la práctica generalidad de núcleos se ha excitado ya la vibración cuadrupolar gigante; cuya frecuencia varía inversamente al radio del núcleo. La energía equivalente está en el intervalo de 10 a 20 MeV.



9. LA SECCION EFICAZ DE COLISION de los núcleos vibrantes en el modo monopolar presenta un pico en el eje del haz (a cero grados). La gráfica muestra la distribución angular de partículas alfa dispersadas inelásticamente por núcleos de plomo. La vibración monopolar tardó siete años en identificarse luego de haberlo sido la vibración cuadrupolar; retraso que se debió a la dificultad de separar las partículas dispersadas a lo largo del eje del haz de las partículas que atravesaban el blanco sin desviarse.

Las primeras indicaciones del modo respirante las encontraron, mediante dispersión de deuterones, Nadine Marty y sus colaboradores en el Instituto de Física Nuclear de la Universidad de París (Paris-Sud) en Orsay. La observación del pico de difracción en la dirección hacia delante, que proporcionó la prueba definitiva del modo monopolar, fue lograda por primera vez en 1977 con dispersión de partículas alfa por un grupo dirigido por Dave H. Youngblood, de la Universidad A & M de Texas. Como el cuadrupolar, el modo respirante tiene una frecuencia que decrece a medida que aumenta el tamaño del núcleo. En unidades de energía, el intervalo está entre 15 y 25 MeV, ligeramente mayor que la energía del cuadrupolo. La vibración octupolar gigante se detectó por primera vez en 1980 en experimentos de colisión realizados con protones de 800 MeV en el Laboratorio Científico de Los Alamos. El modo octupolar tiene una energía que varía de 20 MeV en los núcleos pesados a 30 MeV en los más ligeros.

La historia de la especulación teórica sobre las vibraciones nucleares y las relaciones entre teoría y experimento no encierra menor interés. Los cálculos teóricos predecían un fenómeno nuclear del que no había confirmación experimental, dando a los físicos algunas pistas, aunque imperfectas, acerca de dónde buscar y cómo aparecería en el caso de detectarse. A su vez, la experimentación mostró en qué puntos los modelos teóricos simplificados de núcleos vibrantes fallaban y ayudaron a poner las bases de modelos más potentes basados en hipótesis más ajustadas.

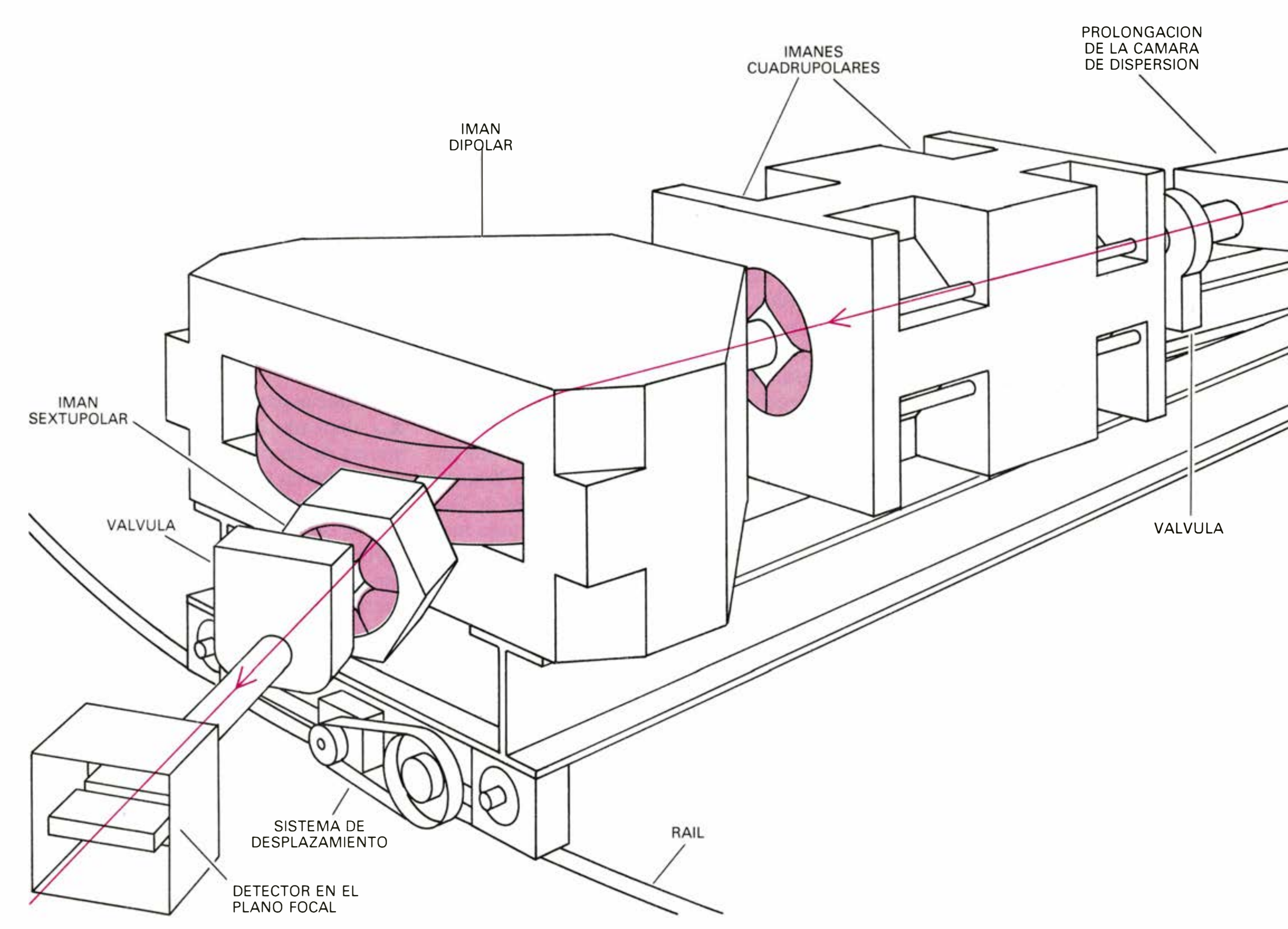
La frecuencia de un cuerpo vibrante depende de dos propiedades: la inercia de las partículas constituyentes, que gobierna la velocidad de respuesta a una fuerza, y la fuerza recuperadora, que se opone al desplazamiento de las partículas. Cuanto mayor sea la inercia, con tanta mayor lentitud vibrará el cuerpo; cuanto mayor sea la fuerza recuperadora, tanto más alta será la frecuencia vibracional. Expresado de una forma numérica: el cuadrado de la frecuencia vibracional es directamente proporcional a la intensidad de la fuerza recuperadora e inversamente proporcional a la inercia.

En 1944 Arkadii B. Migdal, físico ruso, predijo la frecuencia de la vibración dipolar aplicando esas sencillas leyes mecánicas al núcleo. Es fácil construir un modelo plausible de la inercia del núcleo que vibra en el modo dipolar. Suponiendo que todos los nucleones se están moviendo con la misma velocidad en la vibración dipolar (y en distintas direcciones los protones de los neutrones), la inercia equivale a la masa total

del núcleo. Más difícil resulta construir un modelo de la fuerza recuperadora; aquí es donde suelen aparecer las simplificaciones en los modelos teóricos del núcleo. En el caso del modo dipolar, la fuerza recuperadora se debe, principalmente, a la fuerza fuerte atractiva entre protones y neutrones. La intensidad de esta fuerza en un núcleo vibrante se deduce a partir de la energía de enlace de varios núcleos. Entre todos los núcleos, los que tienen un número más o menos igual de protones y neutrones tienen la máxima energía de enlace, aparte de los efectos debidos a la carga eléctrica del protón. Si se trata de construir modelos sobre la interacción protón-neutrón, hay que ajustar la variación sistemática de la energía de enlace con la composición nuclear; el mismo modelo sirve entonces para calcular la fuerza recuperadora cuando los nucleones se desplazan en el modo dipolar.

La frecuencia medida de la vibración dipolar concuerda, de una forma destacada, con la frecuencia predicha por Migdal en su modelo. Pero sabemos ahora que se necesita considerar algo más que la energía potencial de los protones y neutrones separados, si queremos construir un modelo de la fuerza recuperadora del modo dipolar; por si fuera poco, la masa inercial del sistema no es sólo la de los nucleones libres. La masa inercial es ligeramente menor que la supuesta por Migdal, debido a que, en una descripción mecánico-cuántica del núcleo, los protones y los neutrones no son las únicas partículas presentes. Concurren mesones pi, o piones, unas partículas subatómicas responsables principales de la transmisión de la interacción fuerte entre los nucleones. Los piones son mucho más ligeros que los nucleones; por tanto, reducen la masa inercial media. Sin embargo, en el caso de la vibración dipolar las discrepancias son pequeñas y las predicciones basadas en los cálculos de energías de enlace resultan correctas.

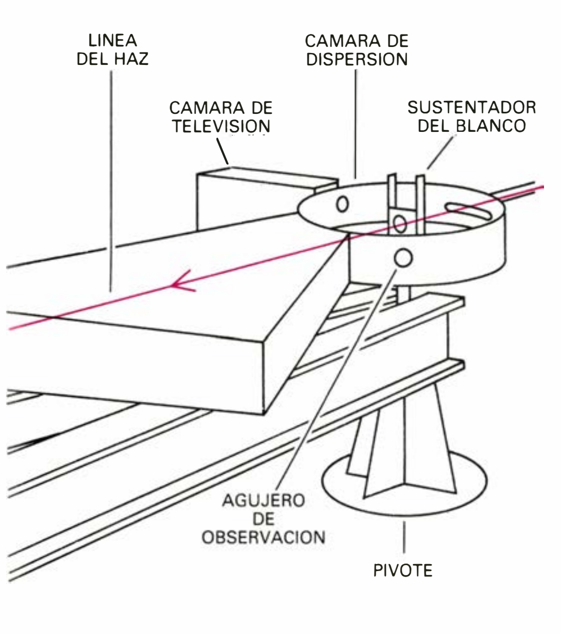
Otro modelo de núcleo, el de la gota líquida, fue propuesto por Niels Bohr en 1936. Bohr tuvo en cuenta el hecho según el cual un nucleón encerrado en el interior de un núcleo está



10. ESPECTROGRAFO MAGNETICO, una versión refinada del espectrómetro de masas. Tiene por función separar las partículas que han perdido una determinada cantidad de energía al excitar una vibración nuclear de otras partículas de un haz. El haz de partículas provenientes de un acelerador se dirige sobre una fina lámina del material del blanco en la cámara de colisión del espectrógrafo. Tras interaccionar con el blanco, los proyectiles se clasifican según su energía mediante un imán dipolar que los desvía en una trayectoria circular. La partícula dotada de energía mayor sigue un arco más amplio en el campo magnético que otra portadora de menos energía. Sólo las partículas que tienen la energía que se selecciona atraviesan el imán hacia el detector. Los imanes cuadrupolares focalizan el haz; un imán sextupolar corrige las aberraciones de focalización. En el espectrógrafo de la Universidad estatal de Michigan, que es el que se muestra aquí, el detector consiste en una cámara de ionización gaseosa multihilo. Las partículas de alta energía ionizan

rodeado por otros nucleones que tiran de él en todas direcciones por igual, de manera que la fuerza resultante es cero. Por otro lado, un nucleón instalado en la superficie tiene otros nucleones por un solo lado, y así resulta atraído hacia el centro. El efecto de los nucleones de la superficie recuerda la tensión superficial de una gota de agua; en ambos casos, la fuerza tiende a que el sistema adopte una forma esférica.

Las frecuencias de vibración de una gota líquida fueron calculadas por Lord Rayleigh a finales del siglo XIX. En 1952 el hijo de Niels Bohr, Aage Bohr, y Ben R. Mottelson se mostraron partidarios de aplicar el modelo de la gota líquida a ciertas vibraciones, la cuadrupolar entre ellas, en las que el núcleo oscila entre formas esféricas y deformadas. En estas vibraciones, la fuerza recuperadora dominante sería la tensión superficial nuclear. Por ser esta última bastante débil, Bohr y Mottelson predijeron una frecuencia baja para el modo cuadrupolar. Se encontraron movimientos de aspecto cuadrupolar a bajas frecuencias, pero sólo unos pocos nucleones, siempre menos del 10 por ciento, participaban en los movimientos. La vibración cuadrupolar gigante tiene una frecuencia muy por encima de cuanto se le había asignado.



los átomos de gas de la cámara. Los electrones que se liberan son atraídos hacia el punto más cercano de un conjunto de hilos paralelos de la cámara de detección. Las corrientes inducidas en los hilos se detectan individualmente. El espectrógrafo pivota alrededor de la cámara, para medir la probabilidad de dispersión en función del ángulo.

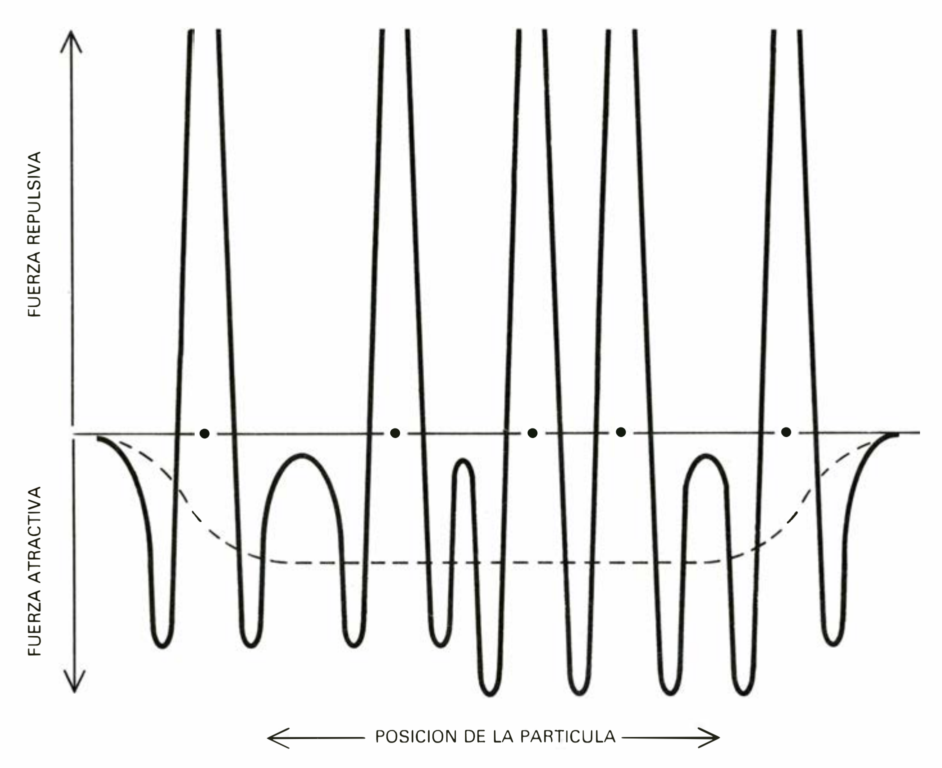
El problema que plantea el modelo de la gota líquida es que los nucleones no poseen la misma libertad de movimiento en el núcleo que disfrutan las moléculas en una gota. Los nucleones deben obedecer el principio de exclusión de Pauli, que establece que dos nucleones idénticos no pueden tener exactamente el mismo estado de movimiento mecánico-cuántico. En consecuencia, dos protones o dos neutrones que posean la misma orientación del espín ocuparán diferentes órbitas en el núcleo. Su movimiento está restringido; deben mantener separadas sus trayectorias.

La inclusión de los efectos cuánticos exige una teoría mucho más elaborada, que describiré ahora. La teoría aporta un resultado bastante simple e inesperado para las vibraciones gigantes; a saber: el núcleo tiene una rigidez en virtud de la cual se comporta como un sólido más que como un líquido. La fuerza recuperadora en la vibración cuadrupolar está regida por la constante elástica del medio nuclear. El valor de la constante elástica se deduce de la teoría cuántica; es proporcional a la energía cinética de los nucleones en sus órbitas del modelo de capas. Principios físicos similares determinan las fuerzas que median entre los átomos ordinarios en un sólido. Si dos átomos se acercan hay una fuerza repulsiva que tiene su origen en el aumento de la energía cinética de los electrones, que a su vez se debe a las exigencias del principio de exclusión. Sin embargo, la materia nuclear es mucho más rigida que la materia ordinaria, porque los nucleones encerrados en el núcleo tienen mucha más energía cinética que los electrones del átomo. Dada la constante elástica de la materia nuclear obtenida de la teoría cuántica, la frecuencia de la vibración cuadrupolar puede calcularse a partir de una fórmula para las vibraciones elásticas de una esfera, que desarrolló hace más de un siglo A. E. H. Love.

La gran rigidez de la materia nuclear sugiere que las vibraciones cuadrupolares nucleares serán de alta frecuencia. ¿Cómo explicar entonces los movimientos de baja frecuencia similares a los cuadrupolares en los que participan un reducido porcentaje de los nucleones? Si la perturbación que excita una vibración es lenta, resulta bastante fácil mover unos pocos nucleones hasta órbitas vacías de aproximadamente la misma energía. El principio de exclusión no prohíbe una tal transición, y el núcleo actúa, preferentemente, como un líquido. Pero cuando un proyectil de alta velocidad golpea el núcleo, no queda tiempo para reajustes internos y dominan las vibraciones gigantes. En conclusión, la respuesta nuclear a una fuerza externa se parece a la que muestra la masilla o cemento absurdo (Silly Putty) de que hablábamos al principio del artículo, que actúa como sólido elástico ante fuerzas repentinas y como líquido viscoso frente a las lentas.

La frecuencia de la vibración monopolar puede deducirse también a partir de un sencillo modelo del núcleo en el que sólo se toman en consideración la inercia de los nucleones y la fuerza recuperadora dominante de la vibración. En este caso, la fuerza recuperadora es la resistencia a la compresión de la materia nuclear. (En el movimiento "respirante" de una vibración monopolar, el núcleo se comprime y se rarifica alternativamente.) Del modelo respirante se habló mucho antes de que se realizaran los cálculos cuánticos de la vibración monopolar; más tarde, la teoría del campo medio confirmó la validez de una fuerza basada en la compresibilidad de la materia nuclear. A pesar de lo cual no se ha podido calcular, de manera fiable, el coeficiente de compresibilidad o medirlo por otros métodos; así pues, la observación de la vibración monopolar proporciona la información más directa sobre la compresibilidad de la materia nuclear. El coeficiente derivado del modelo respirante, junto con la frecuencia de vibración observada, han recibido, no obstante, una confirmación espectacular de un campo muy diferente.

Cuando una estrella pesada se acerca al final de su vida, las fuerzas gravitacionales centrípetas no quedan compensadas por la presión hacia fuera ejercida por los gases calientes que se han producido en las reacciones nucleares; la estrella empieza a colapsar. La gravitación comprime la parte central de la estrella hasta la densidad de la materia nuclear; en ese momento la



11. MODELO MECANICO CUANTICO llamado del campo medio. Se trata de un modelo que proporciona una explicación más satisfactoria de las vibraciones nucleares que la que ofrecen los modelos basados en la mecánica clásica. La fuerza ejercida sobre cualquier nucleón por los otros nucleones de un núcleo fluctúa ampliamente. El cálculo de la trayectoria de un nucleón en este campo presenta dificultades insuperables. No sólo el campo es complejo, sino que cambia deprisa, pues los nucleones que crean el campo están ellos mismos en movimiento. El modelo del campo medio simplifica el problema postulando un campo suave, aunque variante, que no es más que el promedio de todas las fluctuaciones del campo verdadero. Se calcula un campo medio aproximado a partir del movimiento de las partículas; después, se deduce el movimiento a partir del campo estimado. Cálculos iterados aportan una aproximación del campo variante que corresponde a la distribución variante de los nucleones durante la vibración. El que se muestra aquí es una distribución unidimensional de nucleones; la verdadera es tridimensional.

gran resistencia de la materia nuclear a una mayor compresión comienza a oponerse al colapso gravitacional. En función de la compresibilidad de la materia nuclear (entre otras cosas), el colapso puede continuar hasta la formación de un agujero negro o puede detenerlo una onda de choque hacia fuera que expulse las capas externas de la estrella en una explosión supernova. En el centro de la explosión permanece una densa estrella de neutrones; la masa máxima que puede tener una tal estrella depende directamente del coeficiente de compresibilidad. Hasta la fecha, existe un buen acuerdo entre el intervalo observado de masas de estrellas de neutrones y el coeficiente de compresibilidad deducido de la vibración nuclear monopolar.

Una teoría exacta de la estructura nuclear (por oposición a un modelo) especificaría, pormenorizadas, las fuerzas ejercidas por cada nucleón sobre otro nucleón. En un núcleo de tamaño moderado, por ejemplo el oxígeno 16, deben considerarse 120 apareamientos de nucleones. Además, según la mecánica cuántica, todas las configuraciones posibles de los nucleones han de contemplarse a la vez; a cada configuración se le debe asignar una amplitud en la ecuación de ondas cuántica. Las amplitudes relativas serían independientes del tiempo en una descripción del núcleo no excitado, pero en el movimiento vibracional variarían desde luego con el tiempo. En cualquier caso, no hay forma matemática de abordar así el sistema. El modelo de capas ofrece una descripción simplificada; aunque se trata de una aproximación, recoge cuanto da de sí la física cuántica y se ajusta bastante a la hora de explicar muchas propiedades del núcleo. El modelo de capas no pretende calcular todas las interacciones entre nucleones. Antes bien, se limita a definir un único potencial o campo medio de fuerzas; éste representa el efecto colectivo de todas las partículas sobre cualquier partícula dada. La ecuación de onda cuántica se resuelve para una sola partícula en este potencial común.

El problema reside entonces en la elección del potencial apropiado. Se parte de la distribución de partículas en un núcleo no excitado; la suma de los campos asociados a los distintos nucleones da un potencial colectivo aproximado. El paso siguiente consiste en volver atrás y alterar las funciones de onda de las partículas individuales de acuerdo con el potencial estimado. Por aproximaciones sucesivas, se encuentra un potencial y un conjunto de funciones de onda de las partículas que son mutuamente coherentes. Este método fue introducido por William Hartree para describir el comportamiento de los electrones en un átomo; la técnica se ha mostrado muy útil en física nuclear y constituye la base del modelo de capas nuclear. El modelo de capas corriente es una teoría estática, si bien se puede fácilmente admitir que el campo potencial dependa del tiempo a fin de describir las vibraciones.

La teoría del campo medio dependiente del tiempo se aplicó, por primera vez, a las vibraciones nucleares en la década de 1960. El cambio que provoca en el potencial una fuerza externa se calcula a partir del cambio ocurrido en la distribución de los nucleones desde un punto del ciclo vibracional hasta el siguiente. De nuevo se recurre a un procedimiento reiterativo para dar una descripción aproximada del campo. El potencial que actúa sobre los nucleones se deduce del movimiento de los mismos. A su vez, la aproximación del campo resultante sirve para refinar las funciones de onda iniciales, que especifican un nuevo potencial aproximado. Por último se halla un conjunto de funciones de onda que ajusta la distribución de partículas y el campo de potencial para los sucesivos puntos del ciclo vibracional. El método admite una simplificación en el caso de vibraciones de pequeña amplitud.

A la teoría del campo medio, mejor que a los demás modelos sencillos del núcleo, debemos la base teórica de los estudios vibracionales desarrollados a lo largo de los últimos 10 años. En 1952 Mottelson predijo la frecuencia de la vibración cuadrupolar basándose en el modelo de la gota líquida; como he indicado, tal frecuencia resultaba demasiado baja. En 1969, Mottelson postuló la frecuencia de la misma vibración basándose en la teoría del campo medio. Cuando por fin se detectó la vibración en 1971, la frecuencia observada concordaba con esta segunda predicción.

Las vibraciones dipolar, cuadrupolar y monopolar son, todas, deformaciones geométricas con claras analogías con las vibraciones de los cuerpos macroscópicos que nos rodean. Las vibracio-

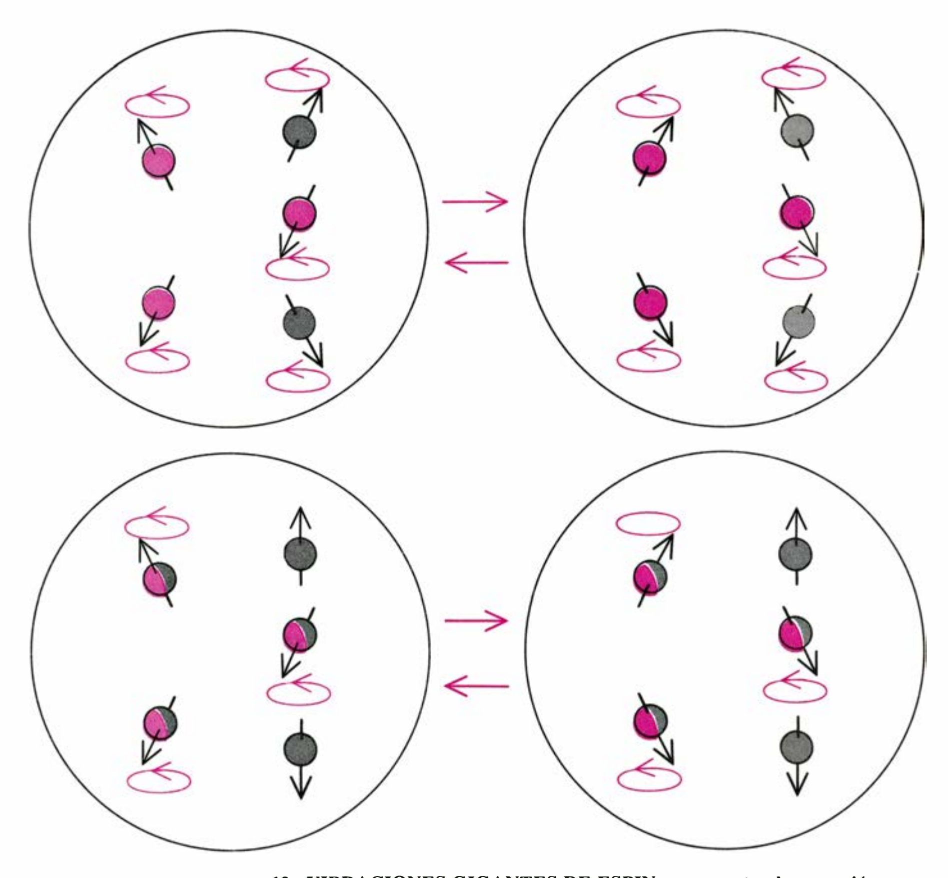
nes de espín de los núcleos son, por contra, absolutamente distintas. El espín es una propiedad intrínsecamente mecánico-cuántica; en los sistemas macroscópicos no hallamos movimientos parangonables. Las vibraciones de espín se diferencian de las vibraciones de forma en que la distribución espacial de los nucleones puede permanecer fija, variando solamente con el tiempo la orientación del espín. Cuando no hay movimiento espacial, el principio de Pauli se torna más coercitivo: se limita a unos cuantos el número de nucleones que pueden participar en la vibración de espín. En el núcleo no excitado los espines están casi todos apareados; el proceso de excitación ladea los espines de algunos de los nucleones y éstos precesan. Hay varias maneras de inducir y detectar la precesión del espín. El espín del nucleón tiene un momento magnético asociado y puede interaccionar a través del campo electromagnético. Así pues, la absorción fotónica y la dispersión de electrones constituyen dos técnicas para estudiar las propiedades de espín de los núcleos.

Hay otros campos que interaccionan con los espines de los nucleones. Por ejemplo, el campo del mesón pi. Cuando un nucleón absorbe un pion, cambia la orientación del espín del nucleón. Un nucleón individual está rodeado por un campo piónico, de suerte que los propios proyectiles nucleónicos inducen vibraciones de espín. Con el espín interacciona también el campo débil, mediado por la partícula *W* recientemente observada. El campo débil es responsable de la desintegración beta, uno de los principales mecanismos que intervienen en la formación de los elementos estables. En la desintegración beta, el neutrón se cambia en protón o viceversa, lo que suele ocurrir con una reorientación del espín de la partícula afectada.

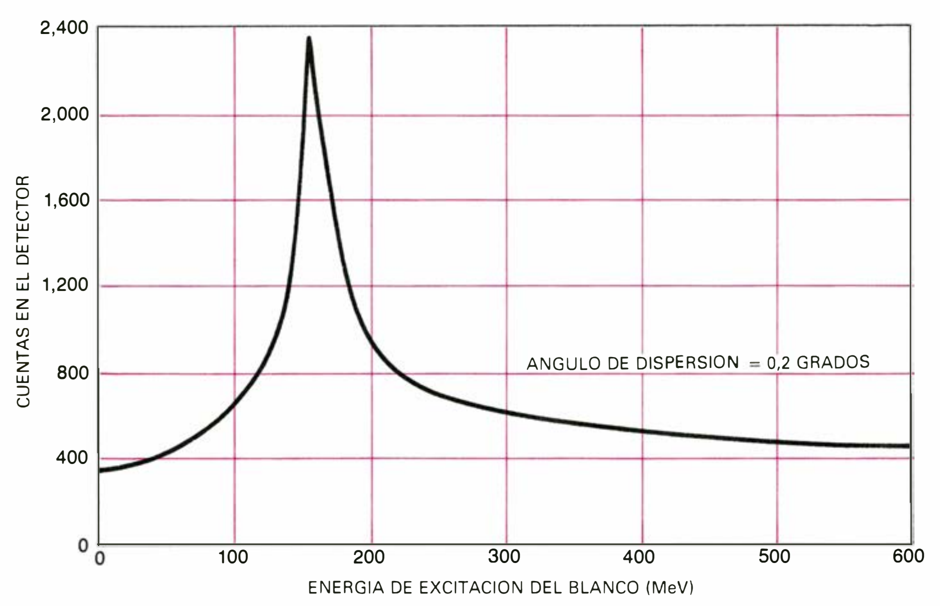
Para estudiar las vibraciones de espín, una de las mejores técnicas experimentales de que se dispone es la dispersión inelástica de protones de alta energía por un blanco nuclear. El campo de piones del protón interactúa con los nucleones del blanco; casi todos los pormenores de la interacción se deben al pion. Si el pion intercambiado es neutro, las cargas eléctricas del proyectil y del blanco permanecerán inalteradas, y la colisión aparece como un ejemplo de colisiones inelásticas ordinarias. Cabe también intercambiar un pion cargado, en cuyo caso cambia la carga del proyectil y la del blanco. El protón bombardeante se convierte en un neutrón; en el blanco, un neutrón se convierte en protón. A pesar del intercambio de carga, los mismos efectos difractivos determinan la distribución angular del haz dispersado. La vibración de espín más simple posible, que es uniforme sobre toda la superficie del núcleo, da lugar a una figura de difracción con un pico en cero grados, igual que hace la vibración monopolar gigante.

La vibración de espín de intercambio de carga se llama resonancia gigante de Gamow-Teller, en virtud de su relación con el proceso de desintegración beta con cambio de espín descrito por George Gamow y Edward Teller. La resonancia gigante de Gamow-Teller la observó, por primera vez, en 1976, Robert Doering, que era entonces un estudiante graduado en la Universidad estatal de Michigan. La energía del haz de protones era bastante baja y el pico de difracción a duras penas se distinguía del fondo de neutrones, provenientes de interacciones más complejas con el blanco. Más recientemente, experimentos realizados en el ciclotrón de la Universidad de Indiana con haces de más alta energía produjeron figuras de difracción en las que el fondo era muy reducido. Las figuras más claras permiten medir con mayor precisión las propiedades de la vibración. La energía de la vibración cae en el intervalo de 10 a 15 MeV.

Podemos comparar las energías medidas con las predicciones teóricas y así corroborar lo que atribuimos a las fuerzas de espín. No hay modelos clásicos para las vibraciones de espín, pero puede aplicarse la teoría del campo medio. Las predicciones están de acuerdo con las medidas, lo que demuestra que la descripción teórica de las fuerzas de espín, basada principalmente en los campos piónicos de los nucleones del núcleo, es correcta en sus líneas generales. Teoría al margen, hacía tiempo que se tenían pruebas indirectas de la existencia de la resonancia gigante de Gamow-Teller. Los ritmos de transición de la desintegración beta tienden a ser mucho más bajos de lo previsto a partir del modelo de capas, lo que revela una magnitud pequeña para la precesión



12. VIBRACIONES GIGANTES DE ESPIN: representan la precesión coordinada de los ejes de espín de los nucleones. En la resonancia gigante dipolar magnética (*arriba*), un protón y un neutrón se desvían en direcciones opuestas; sus ejes de espín precesan con un defasaje de 180 grados entre sí. Como consecuencia de la precesión coordinada de una fracción de los nucleones, el núcleo, como un todo, adquiere un espín resultante y un momento magnético resultante. En la resonancia gigante de Gamow-Teller (*abajo*), un protón se convierte en un neutrón y su espín se desvía de su orientación original.



13. SECCION EFICAZ DE COLISION DE LA VIBRACION de espín gigante. Se parece a la de la vibración monopolar gigante. Muestra un pico en un ángulo próximo a cero grados con respecto al eje del haz. La diferencia entre una y otra estriba en que el proyectil, un protón, intercambia carga eléctrica con un neutrón del núcleo blanco en el proceso de la excitación de la vibración, de manera que las partículas dispersadas son neutrones en vez de protones. En este caso, protones de una energía de 160 MeV excitan la vibración gigante de espín en núcleos de plomo y dan un haz difractado de neutrones de 146 MeV de energía. Como los neutrones carecen de carga, resulta fácil separarlos del haz de protones y medir la dispersión en la dirección del haz. Sin embargo, los neutrones no se desvían por un campo magnético, de manera que su energía no puede medirse en un espectrógrafo magnético. En cambio, se mide su velocidad calculando el tiempo de vuelo transcurrido hasta un detector que está situado a 100 metros del blanco.

del espín a baja frecuencia. A partir de aquí se deduce que las fuerzas de espín originan una precesión de más alta frecuencia: la vibración gigante.

La última vibración que examinaremos será la resonancia dipolar magnética, parecida a la resonancia de Gamow-Teller. La principal diferencia que media entre una y otra consiste en que, en la primera, no se altera el número de protones y neutrones. En la resonancia dipolar magnética el espín del protón se desvía en dirección opuesta al espín del neutrón. Como los momentos magnéticos de los protones y los neutrones tienen signos opuestos, el momento magnético total se hace máximo en esta configuración. Como sugiere el nombre de la vibración, el campo magnético presenta un aspecto dipolar.

Resulta relativamente fácil estudiar las propiedades de la excitación magnética de los núcleos ligeros, ya que la estructura no encierra mayor complejidad cuando hay sólo unos pocos nucleones. Dependiendo del núcleo y del grado de apareamiento, aparecerá una prominente vibración de espín. Sin embargo, hasta hace poco era muy limitado nuestro conocimiento de las excitaciones magnéticas de los núcleos pesados, a pesar de una larga búsqueda de la resonancia dipolar magnética. Situación que acaba de cambiar. En 1981, se encontró la resonancia dipolar magnética en el núcleo de circonio 90 usando dispersión inelástica de protones para excitar los espines de los nucleones del blanco. El experimento se realizó en Orsay con protones de 200 MeV y un espectrógrafo capaz de identificar sucesos de colisiones inelásticas en ángulos pequeñísimos, de dos grados. La energía de excitación de la resonancia dipolar magnética va desde 8 MeV en los núcleos pesados hasta 15 MeV en los núcleos ligeros.

Aspecto curioso, y no carente de interés, de la resonancia de Gamow-Teller y de la dipolar magnética es el siguiente: sólo una tercera parte del número esperado de nucleones parecen participar en la vibración, en el caso de núcleos pesados. Esta es una de las razones por las que se hizo difícil observar la resonancia dipolar magnética. Esa escasa intensidad indujo la búsqueda, por parte de los físicos nucleares, de una comprensión cabal de las vibraciones en un nivel más profundo. Los protones y los neutrones no se suponen ya las últimas partículas elementales; se las cree objetos constituidos por otras entidades fundamentales: los quarks. Todo cambio en el espín del nucleón implicará, necesariamente, algún cambio en el estado de movimiento del quark. Los espines de los quarks interaccionan mucho más fuertemente que los espines de los nucleones y confieren al sistema una tendencia a precesar a mucha más alta frecuencia. Se reduce, por tanto, el número aparente de espines que vibran a baja frecuencia.

La reducida participación en la vibración de Gamow-Teller tiene consecuencias en astrofísica, sobre todo en la teoría de las supernovas. Durante el colapso de una estrella, los núcleos de la parte central sufren una desintegración beta inversa en la que un protón, un electrón y un antineutrino se combinan para formar un neutrón. La cantidad de energía disponible para expulsar las capas externas de la estrella resulta ser proporcional a la fracción de los núcleos que intervienen en el proceso. Como las especies nucleares que participan no existen en el laboratorio, hemos de apoyarnos en la teoría de las vibraciones de espín para buscar una razón al proceso de explosión de las estrellas.

Los modelos vibracionales y la teoría del campo medio han explicado con éxito las frecuencias de las vibraciones, pero no justifican un punto importante del movimiento: el amortiguamiento de las vibraciones, la disminución en la amplitud y la extinción final del movimiento con el tiempo. Desde el punto de vista experimental, el amortiguamiento se manifiesta como un ensanchamiento del pico de la resonancia en las medidas de la frecuencia vibracional. A partir de la anchura de una resonancia, sea 4 MeV para una vibración típica dipolar o cuadrupolar, se calcula que el núcleo oscila durante unos tres ciclos antes que el movimiento se amortigüe.

Los mecanismos responsables del amortiguamiento no se conocen muy bien. Las colisiones entre los nucleones amortiguarían el movimiento rápidamente, pero el principio de exclusión de Pauli limita severamente la probabilidad de tales colisiones. La verdad es que la teoría del campo medio no funcionaría tan bien como lo hace si menudearan las colisiones. Otra posibilidad es que el movimiento vibracional esté acoplado a esquemas más complejos de movimiento en el núcleo. Sin embargo, la teoría del campo medio se ve incapaz de abordar los movimientos complejos, no coordinados, de los nucleones. Se trata de movimientos reales que se manifiestan como secciones eficaces de fondo en la mayoría de medidas. La cuestión del amortiguamiento vibracional y la búsqueda de un modelo teórico que permita dar cuenta de los movimientos más complejos ocupan los primeros planos de la actividad investigadora. Queda mucho por conocer en torno a las vibraciones de los núcleos y, en general, sobre el movimiento cooperativo de las partículas cuánticas.

Microcuerpos celulares

Aunque comparten una estructura superficial similar, se trata de tipos distintos de orgánulos subcelulares. Poseen, cada uno, su propia dotación enzimática, con función metabólica específica

Christian de Duve

A comienzos de la década 1950, un estudiante sueco, Johannes A. G. Rhodin, exploraba células renales de ratón en el laboratorio de Fritjof Sjöstrand, del Instituto Carolino de Estocolmo, uno de los pioneros de la microscopía electrónica. Descubrió un pequeño orgánulo no descrito hasta entonces. Rodeado por una membrana simple que englobaba una matriz granular, medía medio micrometro de diámetro (un micrometro es una milésima de milímetro). La morfología de aquel desconocido componente celular llamó la atención de su joven descubridor y, deseando ligar su nombre a alguna de sus características peculiares, Rhodin (hoy en la Facultad de Medicina de la Universidad de Florida del Sur) lo denominó microcuerpo. Pronto se detectarían en el hígado estructuras similares, muchas de ellas con una masa central densa, microcristalina. Durante varios años, ningún dato permitió aventurar la identidad o la función de tan misterioso microcuerpo.

La morfología es un reflejo de la química. En general, todos los miembros de una población subcelular (piénsese en cualquier orgánulo) tienen la misma composición enzimática. En general también, cada enzima se encuentra en una sola porción celular, por ejemplo, en un determinado orgánulo. La partícula que un citólogo distingue en sus microfotografías puede revelársele al bioquímico como un conjunto característico de picos en las curvas que representan la distribución de determinados enzimas en las fracciones celulares obtenidas por centrifugación a alta velocidad. Cabía esperar, por tanto, que los estudios bioquímicos ayudaran a caracterizar la naturaleza del microcuerpo. Así sucedió, pero hubo que aventurarse por un camino no abierto hasta entonces y lleno de rodeos, experiencia frecuente en investigación básica (para confundir –¡y ojalá aprendan con ello!– a los que abogan por una programación del trabajo científico “orientado hacia una meta”).

A mediados de los años 1950, me encontraba con mis colegas de la Universidad Católica de Lovaina enfrascado en una serie de interesantes experimentos (promovidos por una observación fortuita), que empezaban a permitirnos vislumbrar un nuevo orgánulo intracelular: el lisosoma. Nuestro principal método de trabajo era un protocolo modificado de fraccionamiento celular. Nos había permitido demostrar que, en el hígado de rata, el enzima fosfatasa ácida se segregaba en un grupo especial de partículas de un tamaño intermedio entre las mitocondrias y los “microsomas”, las dos principales entidades citoplasmáticas reconocidas en aquellos días. (Las mitocondrias son los orgánulos de la célula que generan energía; los microsomas, considerados orgánulos en una época, son fragmentos de varios sistemas de membranas celulares internas.)

Aplicando sistemáticamente nuestro nuevo esquema de fraccionamiento a los enzimas que otros investigadores habían asociado a las fracciones mitocondrial y microsómica comprobamos que varias hidrolasas (enzimas que degradan una amplia gama de compuestos biológicos en un medio ácido), aparecían en la fracción correspondiente a la fosfatasa ácida. Fue la asociación de esos enzimas lo que nos llevó a caracterizar el lisosoma: una partícula en forma de saco con enzimas que digieren moléculas de nutrientes, sustancias foráneas y, bajo ciertas circunstancias, componentes de la propia célula.

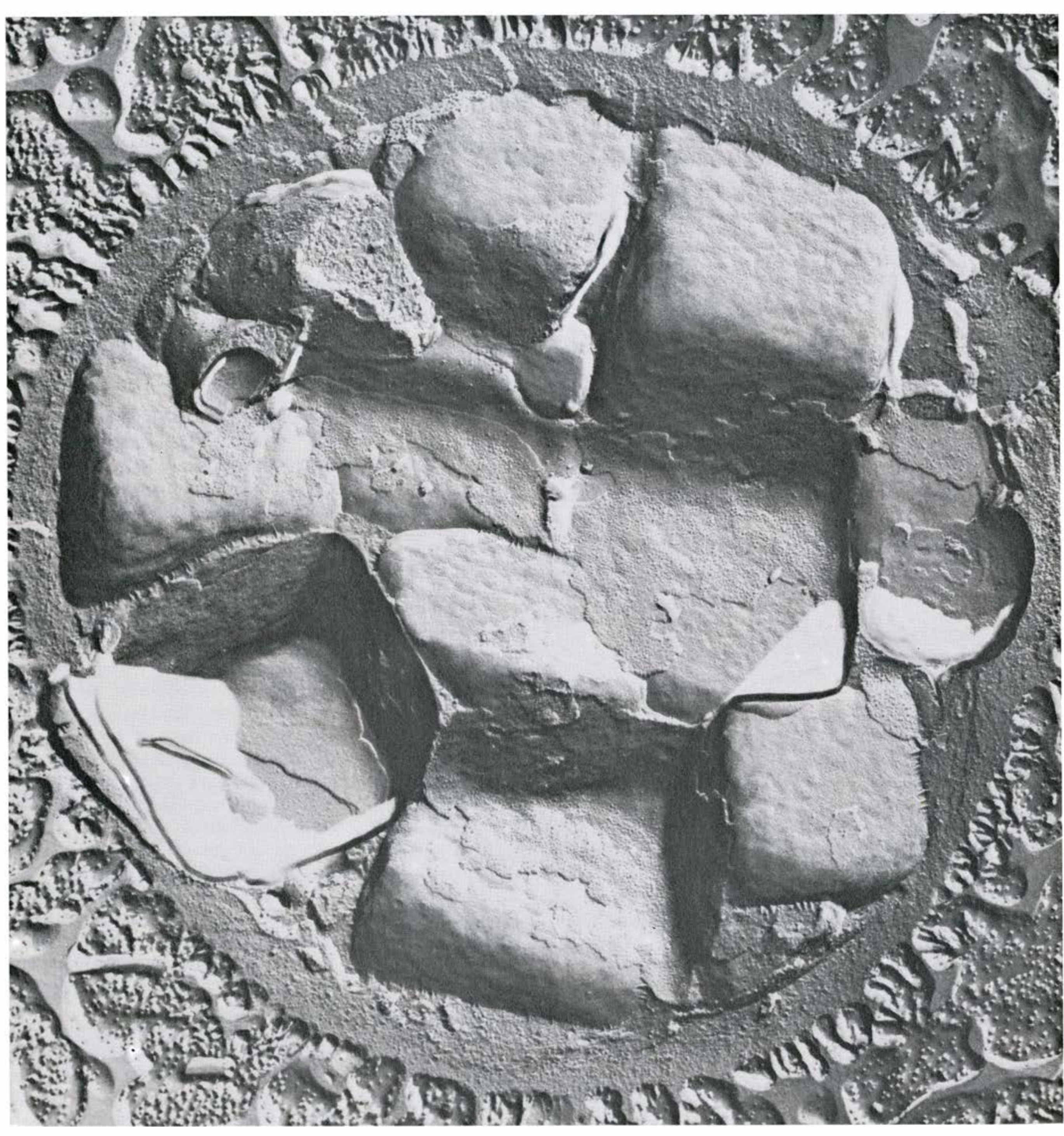
Sin embargo, un enzima oxidante, no digestivo, mostraba el mismo patrón de distribución. Se trataba de la urato oxidasa (o uricasa, como también se la denominaba entonces): un enzima que oxida el urato (o ácido úrico) en alantoína y dióxido de carbono. La habíamos incluído en nuestras mediciones porque Alex B. Novikoff, actualmente en la Facultad de Medicina Albert Einstein, había observado que su comportamiento durante la centrifugación remedaba el de la fosfatasa ácida. Comprobamos que, efectivamente, los dos enzimas se desplazaban juntos al fraccionar tejido hepático por centrifugación diferencial, método que separa entidades en razón de la velocidad a que se sedimentan por centrifugación. Ello no significaba necesariamente que la urato oxidasa y la fosfatasa ácida se encontraran confinadas en una misma partícula. Podía, por el contrario, reflejar la cosedimentación de dos tipos de partículas con el mismo coeficiente de sedimentación, que es una función compleja del tamaño, la forma y la densidad.

Sospechamos que la segunda explicación era la más verosímil, en parte porque la urato oxidasa (a diferencia de la fosfatasa ácida y de otras hidrolasas ácidas del lisosoma) no presentaba la propiedad que habíamos llamado latencia ligada a la estructura: un estado aparentemente inactivo de ciertos enzimas ligados a partículas, que se observa cuando se somete a prueba la actividad enzimática de las partículas en condiciones de ensayo que respetan su integridad estructural. El descubrimiento casual de ese fenómeno (tal como lo presenta la fosfatasa ácida del hígado de rata) fue lo que nos atrajo en primer lugar hacia ese campo: habíamos logrado atribuirlo al hecho de que el enzima “inactivo” se hallaba encerrado en una envoltura membranosa inaccesible al compuesto que, en el ensayo, debía servir de sustrato al enzima. Nuestra sospecha de que la urato oxidasa no estaba dentro de los lisosomas se confirmó al aplicar otro procedimiento de fraccionamiento, el equilibrio de densidades en un gradiente de densidad, en el que cada partícula sedimenta hasta donde su densidad se lo permite. En varios sistemas de esa clase, la fosfatasa

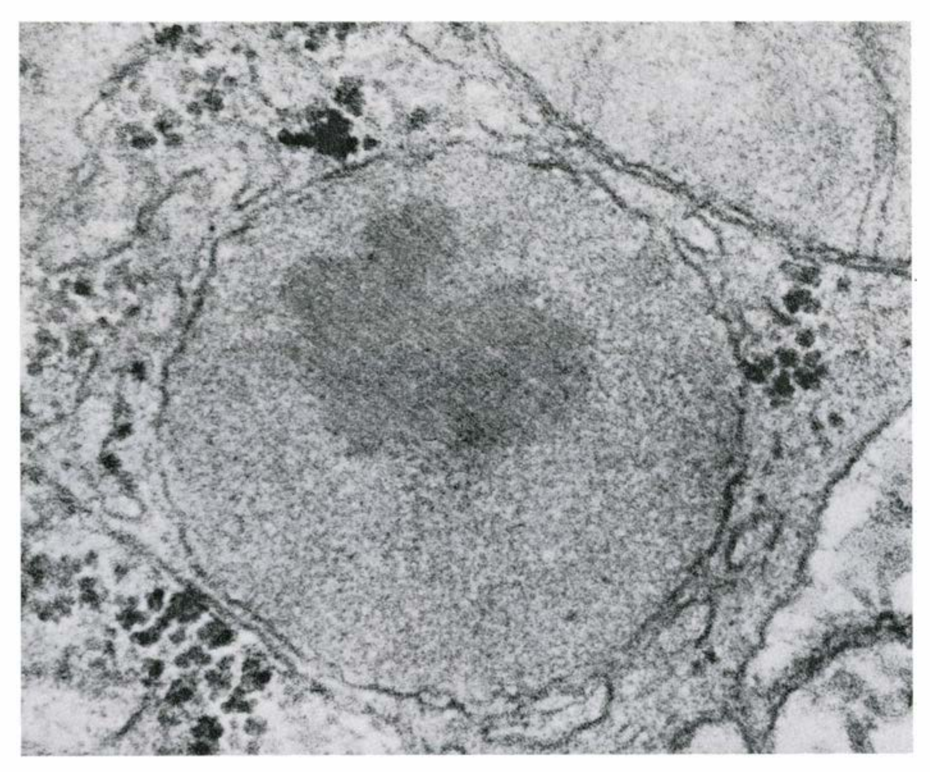
ácida y la urato oxidasa mostraban patrones de distribución claramente diferentes.

La cuestión se dilucidó en un ensayo de mi colega Robert Wattiaux. Inyectó en ratas el detergente suave Triton WR-1339, que se acumula en los lisosomas de las células del hígado, y de otras células, provocando una drástica y selectiva disminución de la densidad de esas partículas. Las partículas que contenían urato oxidasa (y otros enzimas no digestivos que, según se ha visto, sedimentan con ella) no mostraban tal cambio de densidad: se podía así separarlas limpiamente de los lisosomas y las mitocondrias en un gradiente de densidad de sacarosa. Mis colegas Pierre Baudhuin y Henri Beaufay identificaron de esa forma lo que en principio habíamos denominado "uricosomas" (término que refleja nuestra información bioquímica anterior) con la entidad morfológica que Rhodin y otros habían descrito como microcuerpos.

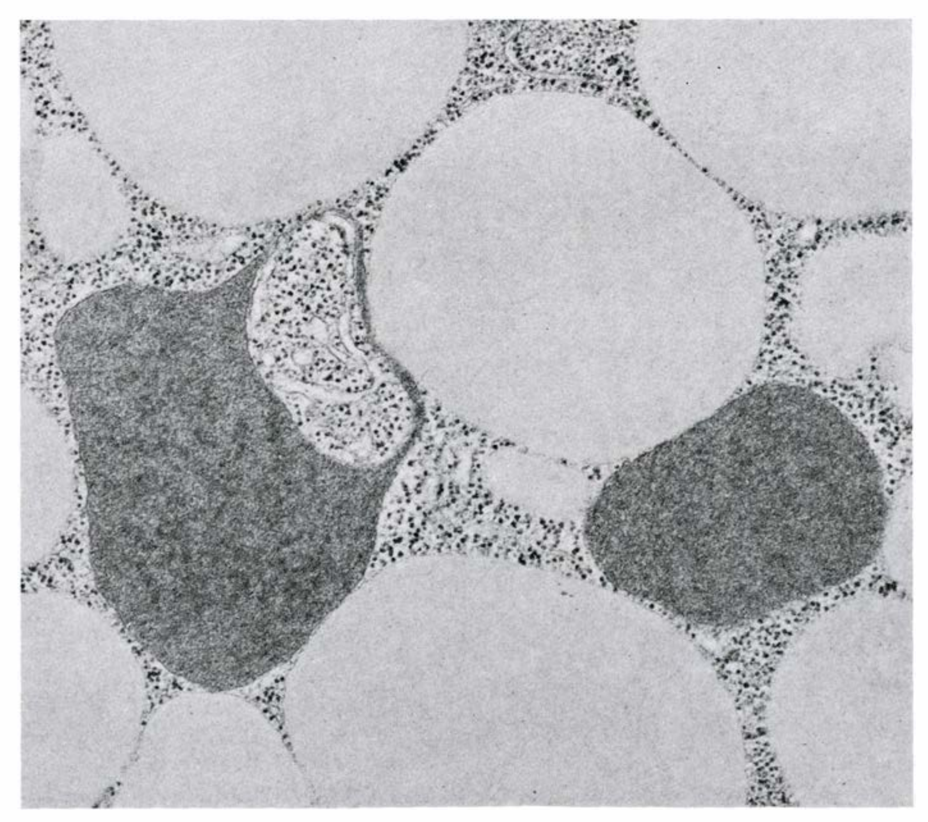
La definición de microcuerpo fue cambiando a medida que nuestras investigaciones se extendían a otros enzimas, aparte de la urato oxidasa, y a



1. PEROXISOMAS, el tipo principal de microcuerpos, embutidos en una célula de levadura. Esta micrografía electrónica de una preparación sometida a criofractura la obtuvo Marten Veenhuis, de la Universidad estatal de Groningen, Holanda. Se trata de unos peroxisomas muy poco comunes; se ha inducido su proliferación cultivando la levadura *Hansenula polymorpha* en un medio con metanol como única fuente de carbono. Los peroxisomas contienen los enzimas alcohol oxidasa y catalasa que, respectivamente, oxidan el metanol, generando peróxido de hidrógeno, y reducen el peróxido de hidrógeno a agua. La muestra se preparó congelando la levadura y luego fracturándola. Se sublimó el hielo que quedaba sobre la superficie fracturada y se sombreó la superficie con platino. Seguidamente se cubrió con carbono para obtener una réplica. La réplica de carbono aparece aquí aumentada 36.000 veces.



2. PEROXISOMA DE HIGADO DE RATA aumentado 115.000 diámetros en una micrografía electrónica tomada por Helen Shio, en el laboratorio del autor, de la Universidad Rockefeller. Lo rodea una membrana sencilla y tiene una matriz granular con una parte central semicristalina, más densa. Se aprecian parte de una mitocondria (*arriba a la derecha*) y canales seccionados del retículo endoplásmico.

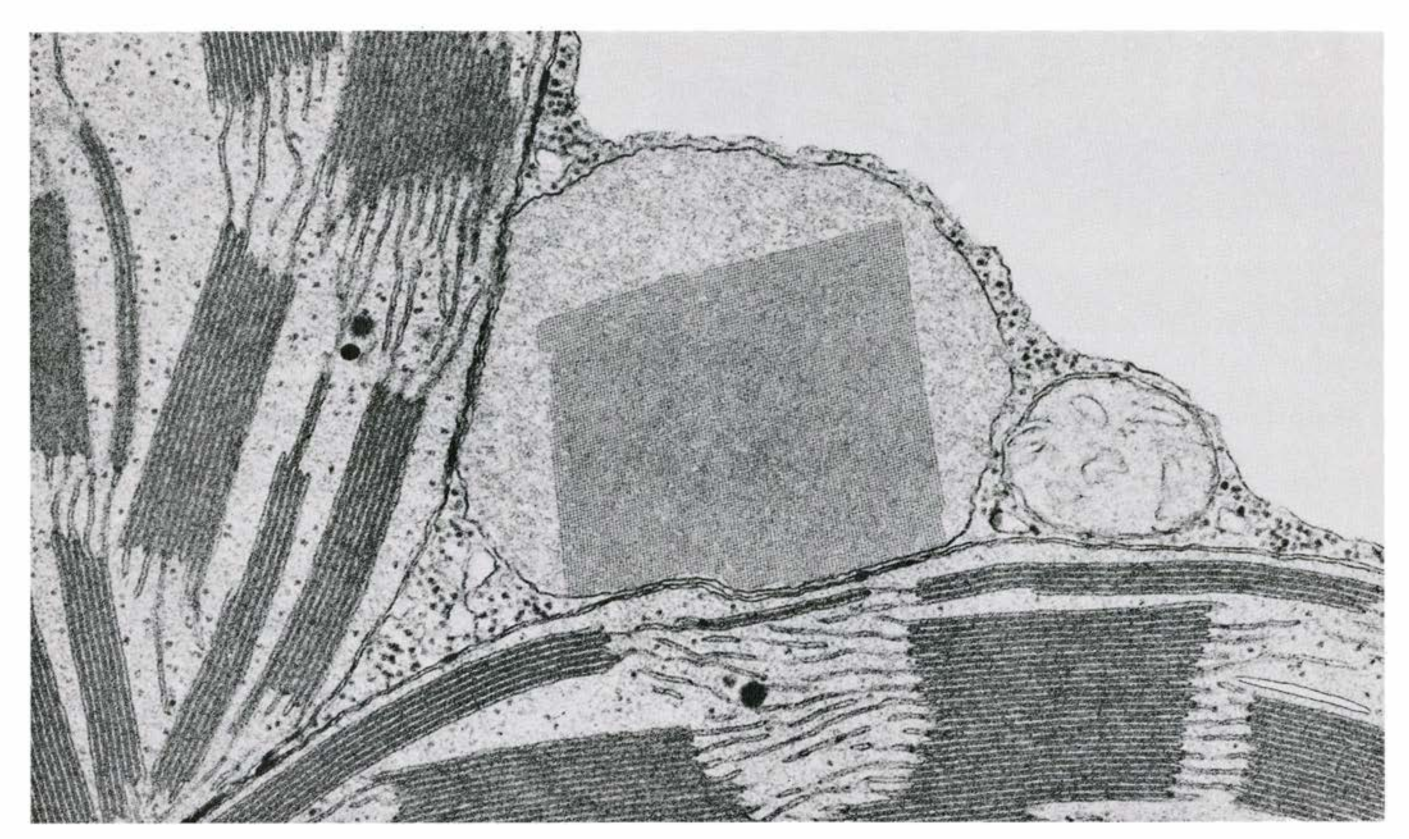


3. DOS GLIOXISOMAS rodeados de gotitas lipídicas (grasa) en una célula de semilla de tomate en germinación, aumentados 32.000 veces en una micrografía electrónica obtenida por Eldon H. Newcomb, de la Universidad de Wisconsin en Madison, y por Peter J. Gruber. Uno de los glioxisomas tiene una inclusión de material citoplasmático. Los glioxisomas, otro tipo de microcuerpo, son peroxisomas que poseen algunos o todos los enzimas necesarios para catalizar el ciclo del glioxilato, una variante del ciclo de Krebs. Los glioxisomas de las células de la plántula contienen también los enzimas de la que se denomina beta-oxidación de los ácidos grasos, cuya materia prima se halla en forma de gotitas de lípido.

otros materiales biológicos, además del hígado de rata. (También se expandió la ubicación de nuestros esfuerzos. En 1962 acepté un cargo en el Instituto Rockefeller de Investigaciones Médicas, ahora Universidad Rockefeller, de Nueva York. Sin embargo, no corté mis vínculos con Lovaina, y desde entonces dividí mi tiempo entre las dos instituciones. Pronto se estableció entre los dos laboratorios algo semejante a un puente aéreo científico, y siguen aún intercambiándose investigadores, hallazgos y técnicas y colaborando en muchos proyectos.) En primer lugar, Baudhuin demostró que la catalasa, un enzima que degrada el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), parecía estar asociada a los microcuerpos del hígado de rata que contenían urato oxidasa. Otto Z. Sellinger, actualmente en el Instituto de Investigación de Salud Mental de la Universidad de Michigan, siguió el mismo procedimiento con la D-aminoácido oxidasa, un enzima que oxida la forma anómala D- de los aminoácidos que se encuentran en ciertos constituyentes de las bacterias.

Durante una visita a Nueva York, Baudhuin unió sus fuerzas a las de Miklós Müller (que había venido a trabajar con nosotros desde Hungría, interesado principalmente en los lisosomas de los protozoos) y con un estudiante de gran talento, Brian H. Poole, ya fallecido. Los resultados de esa colaboración fueron sumamente provechosos. En el riñón de mamíferos (donde ya se habían detectado microcuerpos morfológicamente) y en el protozoo *Tetrahymena pyriformis*, un ciliado cuyo citoplasma contiene también orgánulos semejantes a los microcuerpos, se detectaron partículas bioquímicamente similares a los microcuerpos del hígado, pero que carecían de urato oxidasa. Se observó que las partículas, además de catalasa y D-aminoácido oxidasa, contenían una hidroxiácido oxidasa que actuaba principalmente sobre glicolato y lactato y, en el riñón, pero no en los otros dos materiales, una L-aminoácido oxidasa que actuaba sobre los aminoácidos usuales que componen las proteínas.

Estos hallazgos indicaban que estábamos manejando un orgánulo celular de amplia distribución en el reino animal, presumiblemente. Proporcionaban, además, una posible pista de lo que el microcuerpo desempeña en la vida. Estábamos especialmente impresionados con el hecho de que las diversas oxidasas existentes en las nuevas partículas, aunque oxidaban una amplia ga-



4. PEROXISOMA DE UNA HOJA, un gran microcuerpo que alberga un agregado cristalino notablemente regular, formado, al parecer, por el enzima catalasa; aparece aumentado unas 58.000 veces en esta micrografía de Newcomb y Sue Ellen Frederick. El peroxisoma está encajado entre dos cloroplastos y adyacente a una mitocondria, en una célula de hoja de tabaco; la gran zona despejada es la vacuola central de la célula. La estrecha asociación de las tres clases de orgánulos facilita una ruta metabólica en circuito. El glicolato formado en los cloroplastos se oxida en glioxilato en los peroxisomas; pasos posteriores, que se desarrollan en las mitocondrias y luego otra vez en los peroxisomas, conducen a la formación de carbohidrato en los cloroplastos.

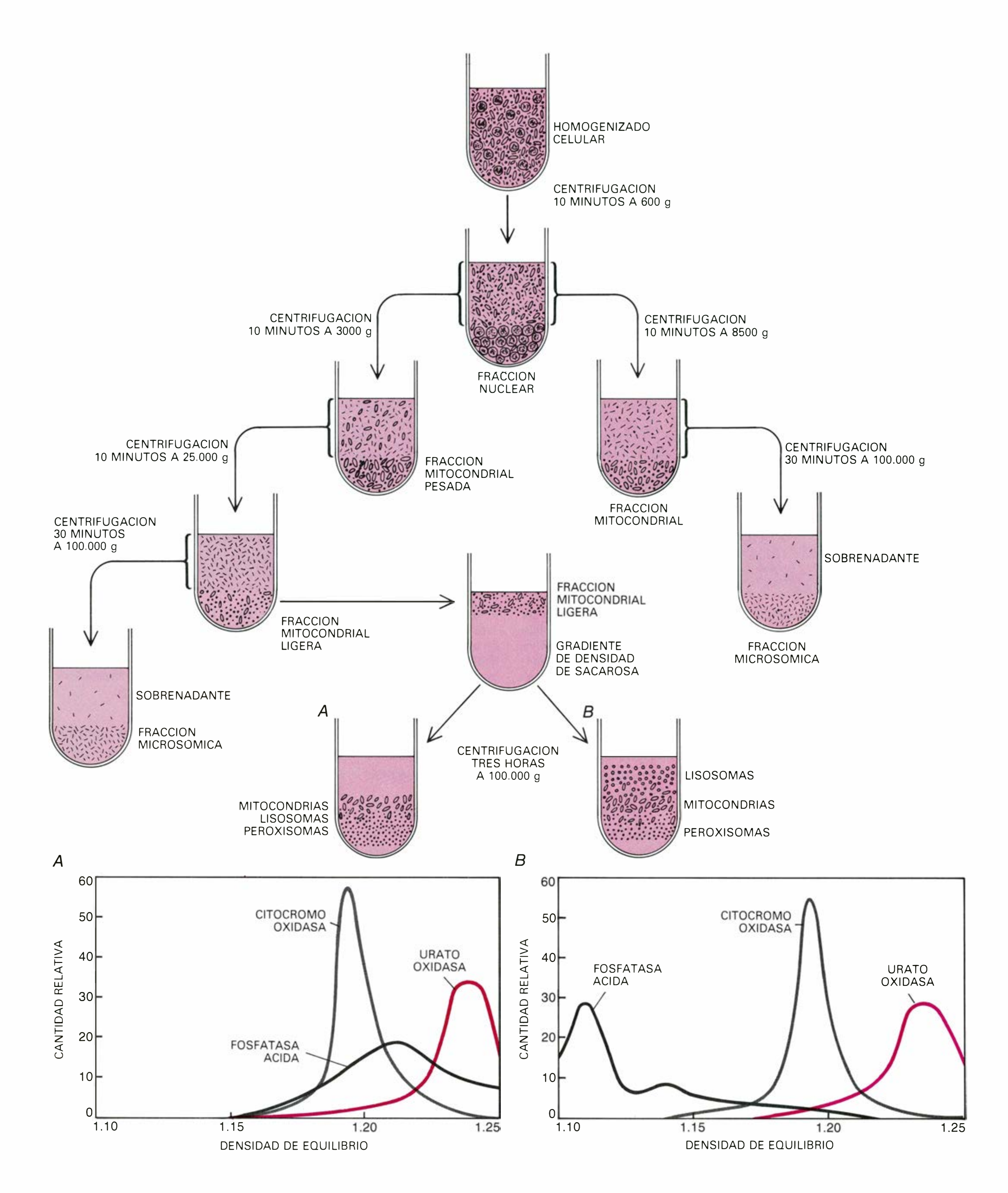
ma de sustratos, poseían una característica en común: al oxidar sus sustratos, reducían el oxígeno a peróxido de hidrógeno; la catalasa reducía luego el peróxido de hidrógeno a agua. Reducir equivale a añadir electrones. Los dadores de electrones de la catalasa son moléculas pequeñas, como metanol, etanol, nitrito o ácido fórmico, o bien, en su ausencia, el propio peróxido de hidrógeno. Por tanto, las oxidasas y las catalasas, en conjunto, podrían constituir una primitiva cadena respiratoria en la que los electrones extraídos de diversos metabolitos se añadirían en último término al oxígeno, para formar agua. Esta cadena, a diferencia de la principal cadena respiratoria de las mitocondrias, estaría mediada por peróxido de hidrógeno y no se hallaría acoplada a las fosforilaciones que proporcionan adenosín trifosfato (ATP), el principal portador de energía de la célula.

Partiendo de estas consideraciones, en 1965 propuse el nombre de peroxisomas para designar a esas nuevas partículas. El término ha recibido amplia aceptación, aunque todavía existe algún problema lingüístico. En todo caso, el concepto a que alude la palabra peroxisoma ha proporcionado un vínculo de relación entre una variedad de partículas de tipo microcuerpo que se encuentran en todos los reinos eucariotas.

El concepto tiene también importancia fisiológica, como han demostrado de forma muy elegante Britton Chance y sus colaboradores, de la Fundación Johnson de Investigación, de Filadelfia. Mediante una técnica espectrofotométrica muy sensible midieron la cuantía en que la catalasa estaba formando un complejo con el peróxido de hidrógeno en hígados de rata intactos, mantenidos en el laboratorio. De acuerdo con la noción de peroxisoma, encontraron que la catalasa de la célula hepática aparecía habitualmente en unión con peróxido de hidrógeno a punto de degradarse; vieron, asimismo, que la adición de sustratos de las oxidasas aumentaba el aporte de peróxido de hidrógeno y que la adición de sustratos de la catalasa aceleraba la cesión compensadora de peróxido de hidrógeno procedente del complejo enzima-peróxido.

Implícita en el concepto de peroxisoma está la importancia central de la catalasa como agente único de la utilización del peróxido de hidrógeno, cualquiera que sea la naturaleza de los sustratos de la oxidasa que hayan permitido la formación del peróxido. En efecto, la catalasa parece hallarse en todos los representantes de la familia de los peroxisomas; constituye, frecuentemente, un importante componente de las partículas: en el hígado de rata, por ejemplo, alcanza el 15 por ciento de su proteína total. Debe matizarse, sin embargo, que los peroxisomas no son el único sitio donde se desarrolla el metabolismo del peróxido de hidrógeno. Existen oxidasas que rinden peróxido de hidrógeno en el citosol (la matriz fluida de la célula) y en la membrana externa de las mitocondrias; y quizá los haya también en algún otro componente celular. La mayoría de las células tienen, además de catalasa, otra peroxidasa, por lo menos, capaz de degradar peróxido de hidrógeno. Hay pruebas de que la propia catalasa no siempre está confinada en los peroxisomas; quizás el citosol las albergue en cantidades apreciables.

El siguiente episodio del relato se inicia con otro intercambio trasatlántico. En 1957, en la Universidad de Oxford, concretamente en el laboratorio del desaparecido Sir Hans Krebs, su discípulo Hans L. Kornberg describió

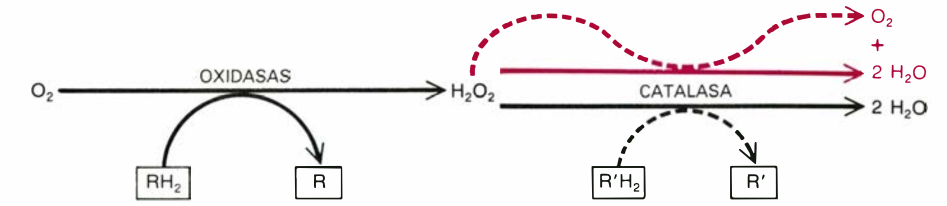


5. FRACCIONAMIENTO POR CENTRIFUGACION. Separa los componentes celulares en fracciones que luego se analizan para comprobar su contenido enzimático; se pone así de manifiesto la asociación de determinados enzimas con ciertas estructuras celulares. Se centrifuga un homogenizado celular a velocidades progresivamente superiores. El protocolo clásico de fraccionamiento (*a la derecha*) producía las fracciones nuclear, mitocondrial y microsómica y un sobrenadante, en su mayor parte fluido. Un procedimiento modificado (*a la izquierda*), desarrollado en el laboratorio del autor hace unos años, subdividía la fracción mitocondrial. La fracción mitocondrial ligera resultante se extendía sobre un gradiente de densidades de sacarosa y se sometía a un equilibrio de densidades (*centro*); se separaban así los componentes en tres capas, en razón de su distinta densidad. Las capas quedaban definidas por los picos de las curvas de tres enzimas marcadores (*abajo*): citocromo oxidasa (un enzima mitocondrial), fosfatasa ácida (cuya presencia en los lisosomas está comprobada) y urato oxidasa, que aparecía asociada a una partícula diferente. Los picos (y las fracciones que definían) estaban próximos entre sí cuando se fraccionaban células de ratas normales (*A*). Al inyectar a las ratas un detergente que se acumulaba en los lisosomas, la densidad de éstos se reducía selectivamente (*B*); así se separaban nítidamente de las partículas que contenían urato oxidasa, es decir, los microcuerpos ahora conocidos por peroxisomas.

el ciclo del glioxalato. En los años 1930, Krebs había esclarecido el ciclo del ácido cítrico (o del ácido tricarboxílico, o de Krebs), la ruta metabólica final para la oxidación de moléculas combustibles. El ciclo del glioxilato es una variante del ciclo de Krebs en la que se salta la sucesión de cuatro reacciones por las que, en el ciclo del ácido cítrico, el isocitrato se convierte en malato con liberación de dos moléculas de dióxido de carbono. El ciclo del glioxalato se desarrolla en una secuencia de dos reacciones que consume un grupo acetilo adicional procedente del acetil coenzima A (acetil CoA), y conduce a la formación de succinato como producto secundario. Mientras que en cada vuelta del ciclo de Krebs uno de los grupos acetilo se oxida totalmente en dióxido de carbono, en el ciclo del glioxilato (cuyo nombre se debe a un intermediario principal de la derivación) dos grupos acetilo se condensan para dar succinato cada vez que se recorre el ciclo.

Una de las principales fuentes de acetil CoA de las células es la denominada beta-oxidación de los ácidos grasos. Además, el succinato generado a partir del acetil CoA por el ciclo del glioxilato puede convertirse en carbohidrato a través de un segmento del ciclo de Krebs, fosfoenolpiruvato y glicolisis inversa. El ciclo del glioxilato puede, por tanto, fomentar la gluconeogénesis, o nueva formación de carbohidrato, a partir de las grasas. Se trata de la principal función biológica del ciclo, de gran relevancia en el metabolismo celular.

Dos investigadores que llegaron a Oxford atraídos por el descubrimiento de Kornberg trasplantaron el interés por el tema a los Estados Unidos. Harry Beevers era uno de ellos. De Gran Bretaña marchó a la Universidad norteamericana de Purdue, donde se puso a trabajar sobre el desencadenamiento del ciclo del glioxilato en semillas de ricino en germinación. Este fenómeno, común a todas las semillas oleaginosas, sirve para proporcionar carbohidrato a los brotes jóvenes (a expensas de las reservas de aceite de las semillas) hasta que aparecen las primeras hojas verdes y se inicia la fotosíntesis. Beevers y su colaborador Rowland W. Breidenbach localizaron el par de enzimas que catalizan los dos pasos de la derivación del glioxilato en lo que parecía ser una nueva clase de partícula citoplasmática. Las partículas contenían otros tres enzimas del ciclo del glioxilato, que podían encontrarse también en las mitocondrias como parte del ciclo de Krebs



6. CADENA RESPIRATORIA PRIMITIVA, mediada por peróxido de hidrógeno (H_2O_2), característica de los peroxisomas, a los que confiere el nombre. Una de las oxidasas de la partícula oxida un sustrato (RH_2), pasando sus electrones al oxígeno para formar peróxido de hidrógeno, que la catalasa reduce a agua. Los electrones para la reducción proceden de alguna molécula de pequeño tamaño ($R'H_2$) o, a falta de otro donante, del peróxido de hidrógeno (*color*). Los dibujos del artículo son de Alan D. Iselin.

normal. Se purificó las nuevas partículas por centrifugación en un gradiente de sacarosa, donde quedaban equilibradas a una densidad elevada, como ocurría con los peroxisomas de hígado; se observó también que poseían las características morfológicas de los microcuerpos. De acuerdo con la bioquímica de las nuevas partículas, Beevers las bautizó con el nombre de glioxisomas.

No suele haber un asiduo contacto entre los cultivadores de la bioquímica vegetal y los de la bioquímica animal. La relación existente entre estos hallazgos y los nuestros podía haber pasado inadvertida durante mucho tiempo de no ser porque otro antiguo compañero de Kornberg, James F. Hogg, del Queens College, adscrito a la Universidad de la ciudad de Nueva York, visitó Oxford, donde investigó el ciclo glioxílico de *Tetrahymena pyriformis*. Mi colega Müller, embarcado en la búsqueda de lisosomas en ese mismo organismo, pidió ayuda técnica a Hogg, y pronto advirtió que debía tender sus redes más ampliamente, es decir, debía buscar también los enzimas del ciclo del glioxilato y los del ciclo de Krebs. Su colaboración condujo al descubrimiento de que los dos enzimas de la derivación del glioxilato se hallaban en los peroxisomas de *T. pyriformis*. En el protozoo, sin embargo, no están acompañados (como sí lo están en los glioxisomas de las semillas de ricino) por los tres enzimas que el ciclo del glioxilato tiene en común con el ciclo de Krebs: esos enzimas se encuentran sólo en las mitocondrias, junto a los demás enzimas del ciclo de Krebs.

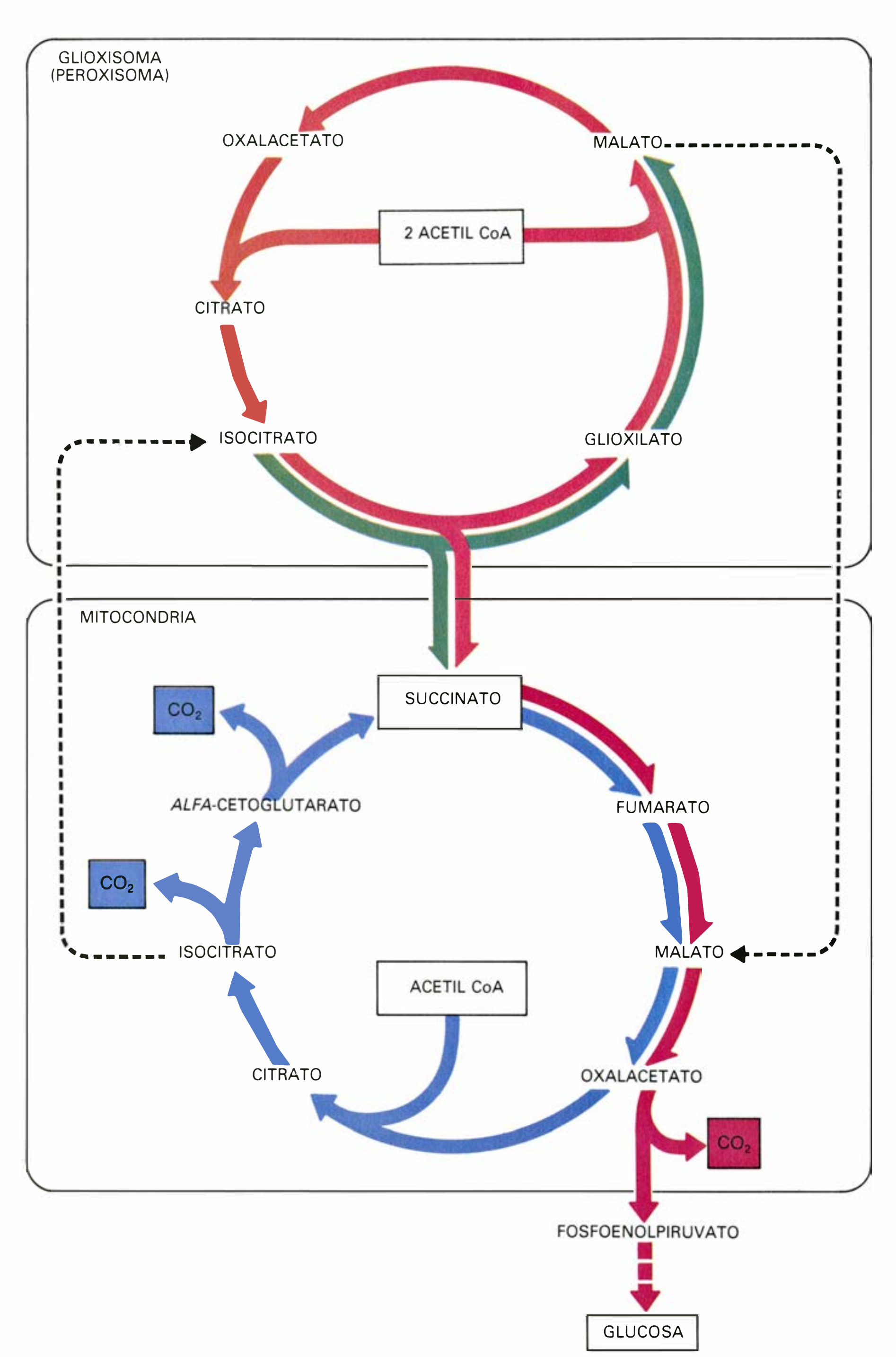
En la primavera de 1967, durante la reunión anual de biólogos americanos que organiza su Federación, Breidenbach dio a conocer los primeros hallazgos sobre las semillas de ricino. Müller había asistido con la intención de hablar sobre la presencia de los enzimas del ciclo del glioxilato en los peroxisomas de *Tetrahymena*. Después de la reunión no tardaron mucho los investigadores de Purdue en detectar catalasa en sus preparaciones de semilla de ricino, así como algunas oxidasas (incluida la urato oxidasa) que rinden peróxido de hidrógeno; se identificaban así los glioxisomas con los peroxisomas. La denominación de glioxisoma sigue prefiriéndose a la de peroxisoma, siempre que los enzimas del ciclo del glioxilato se encuentren en la partícula, lo que induce a confusión, porque no está totalmente claro en qué estadio se convierte un peroxisoma en un glioxisoma. ¿Es necesario que contenga un ciclo completo del glioxilato, como en las plántulas oleaginosas, o basta con que disponga de los dos enzimas de la derivación, como ocurre en *T. pyriformis*? ¿Qué ocurre si no tiene más que uno de ellos?

Aparte del problema de nomenclatura, la diferencia entre los glioxisomas de la semilla de ricino y los peroxisomas del *Tetrahymena* es muy esclarecedora. En las plántulas, los glioxisomas contienen un ciclo del glioxilato y, las mitocondrias, un ciclo de Krebs, ambos completos; hay, pues, una duplicación de los tres enzimas comunes a ambos ciclos. La gluconeogénesis y la oxidación están separadas con toda nitidez; cada una de ellas tiene su propio aporte de CoA. En *Tetrahymena*, las mitocondrias manejan el timón, pues controlan el aporte de isocitrato a los peroxisomas. Domina la oxidación, y sólo las moléculas de isocitrato que no entran en el ciclo de Krebs y sobran de las mitocondrias quedan a disposición de los peroxisomas para iniciar la ruta de la gluconeogénesis. (Las mitocondrias son necesarias para la gluconeogénesis hasta en las semillas oleaginosas; sólo en su seno puede convertirse el succinato en el fosfoenolpiruvato que alimenta la ruta de la glicolisis inversa.)

En los animales superiores, los enzimas del ciclo del glioxilato semejan víctimas de la evolución. Los mamíferos, seres humanos incluidos, son incapaces de fabricar carbohidratos a partir de los ácidos grasos comunes. Hace poco, sin embargo, se detectaron enzimas del ci-

clo del glioxilato en partículas citoplasmáticas de células epiteliales de la vejiga del sapo: se supone que están asociadas a la catalasa, como ocurre en los glioxisomas (peroxisomas) de semillas oleaginosas y de *T. pyriformis*. Este hallazgo apoya la hipótesis que defiende una relación filogenética entre esas partículas, tanto en el reino vegetal como en el animal.

Empeñado en el estudio del glioxisoma, Beevers, junto con T. G. Cooper, descubrió, para su sorpresa, otra ruta metabólica: los glioxisomas de las plántulas procedentes de semillas de ricino germinadas disponían de todos los enzimas necesarios para la beta-oxidación de los ácidos grasos con producción de acetil CoA, capacidad que se creía exclusiva de las mitocondrias. La asociación topográfica de la beta-oxidación con el ciclo del glioxilato contribuye al rendimiento global del proceso gluconeogenético. Los enzimas glioxisómicos para la beta-oxidación catalizan las mismas reacciones que sus correspondientes mitocondriales, con una interesante excepción. El enzima que inicia cada ciclo de oxidación, que en las mitocondrias es una deshidrogenasa que aporta electrones a la cadena respiratoria fosforilante de los glioxisomas, es una simple oxidasa que produce peróxido de hidrógeno. ¡Una copia de los peroxisomas!



7. ES EL CICLO DEL GLIOXILATO (*flechas naranjas*) una variante del ciclo de Krebs (*azul*), la principal ruta metabólica para la oxidación de moléculas de combustible. En el ciclo del glioxilato se produce una derivación que, mediante una sucesión de dos reacciones (*verde*), salta cuatro pasos del ciclo de Krebs y proporciona succinato como producto secundario. El succinato puede convertirse en glucosa y otros carbohidratos (*rojo*). Los glioxisomas de las células de la plántula poseen la dotación completa de enzimas del ciclo del glioxilato; los enzimas del ciclo de Krebs se hallan confinados en las mitocondrias, por lo que se produce una duplicación de los enzimas que catalizan los tres pasos comunes a los dos ciclos. En el protozoo *Tetrahymena pyriformis*, los peroxisomas contienen solamente los dos enzimas de la derivación y carecen de los tres enzimas restantes del ciclo del glioxilato. Las mitocondrias proporcionan isocitrato a los peroxisomas, quienes, a su vez, devuelven malato a las mitocondrias (*flechas negras a trazos*).

Resulta inexplicable que la trascendencia de esta observación tardase más de diez años en reconocerse (hasta por quienes más firmemente creían que los glioxisomas vegetales y los peroxisomas animales guardaban una relación filogenética), no obstante haberse obtenido un hallazgo sumamente sugestivo en el curso de unos estudios sobre el clofibrato, una droga que se administra, para rebajar los lípidos del suero, a los pacientes portadores de un elevado nivel de grasa en sangre. Investigadores de los laboratorios CIBA, de Basilea, habían descubierto, ya en 1965, que el clofibrato inducía una espectacular proliferación de peroxisomas en el hígado de rata.

La observación suscitó gran interés y se confirmó en otros centros. Vióse que otras drogas que rebajaban el nivel hemático de lípidos, incluso algunas sin relación estructural con el clofibrato, producían el mismo efecto, y se concluyó repetidamente que los peroxisomas intervenían en el metabolismo de los lípidos. Sin embargo, hasta 1976 no se corroboró experimentalmente tal supuesto. Paul B. Lazarow, colaborador en el Rockefeller, demostró que en los peroxisomas del hígado de rata había enzimas de la beta-oxidación, cuya presencia aumentaba en un factor de 10 o más después del tratamiento con clofibrato.

El informe de Lazarow desencadenó una serie de estudios de seguimiento en numerosos laboratorios. Takashi Hashimoto, de la Facultad de Medicina de la Universidad japonesa de Shinshu, purificó y caracterizó los principales enzimas de la beta-oxidación del hígado de rata, demostrando que carecían totalmente de relación con los correspondientes enzimas mitocondriales. El sistema de beta-oxidación de los peroxiso-

mas se ha inducido experimentalmente con distintas drogas reductoras del nivel de grasa; puede también inducirse con dietas ricas en grasas o por exposición al frío. Al parecer, en ambos casos la respueta fisiológica adecuada es un aumento de la oxidación de ácidos grasos.

Remedando a la inversa el papel desempeñado por los glioxisomas de las semillas de ricino, los peroxisomas del hígado mediaban un importante proceso de fecundación interdisciplinaria, en este caso el receptor era la bioquímica vegetal y el dador la bioquímica animal. De ese intercambio surgió un mejor conocimiento de la fotorrespiración, paradójico fenómeno que ha inquietado a los bioquímicos vegetales durante décadas.

Como indica el término, la fotorrespiración es un proceso mediante el cual la luz induce un aumento de la cantidad de oxígeno consumido por los tejidos de las plantas verdes. Está asociado a la producción de glicolato por los cloroplastos, los orgánulos fotosintéticos. En el cloroplasto, la ribulosa-difosfato carboxidismutasa, el enzima clave de la asimilación del carbono, tiene una doble función. En ausencia de oxígeno, el enzima actúa exclusivamente para fijar dióxido de carbono, convirtiendo la ribulosa-difosfato en dos moléculas de 3-fosfoglicerato. Sin embargo, cuando se dispone de oxígeno, éste compite con el dióxido de carbono: parte de la ribulosa-difosfato se desvía a una ruta oxidativa alternativa, que produce una molécula de fosfoglicolato y otra de fosfoglicerato, en vez de dos de fosfoglicerato.

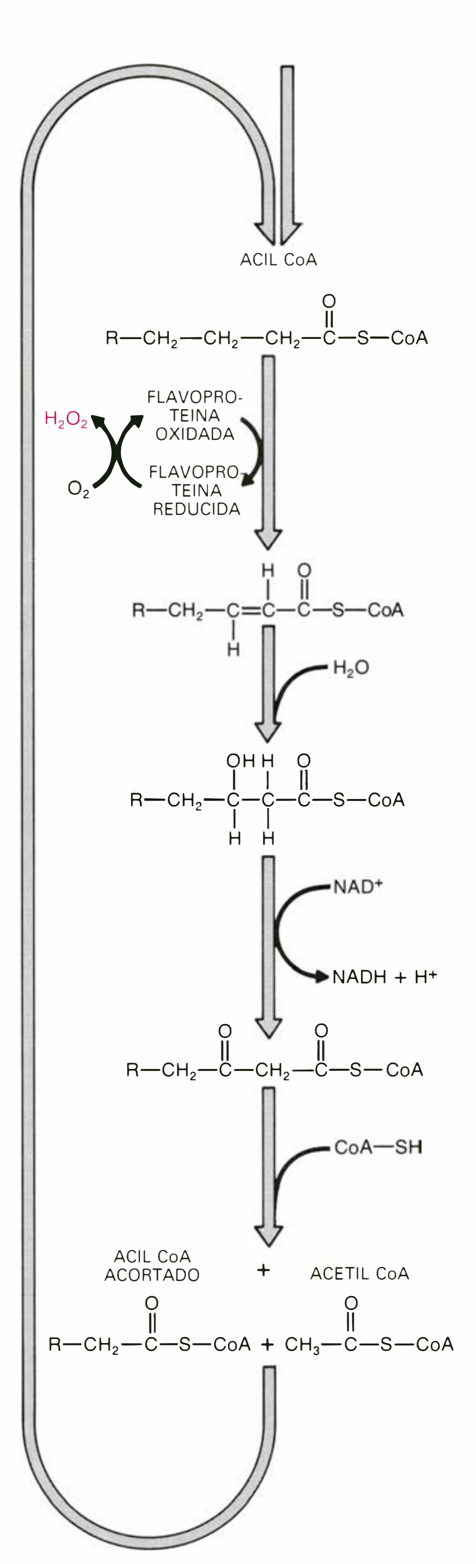
La subsiguiente degradación del fosfoglicolato por una fosfatasa rinde glicolato, principal producto de los cloroplastos aislados y de ciertas algas unicelulares cuando se iluminan en presencia de oxígeno. Cuanto mayor es la respuesta fotorrespiratoria, menor es el rendimiento neto fotosintético de la planta; por cuya razón, la magnitud de la fotorrespiración puede adquirir importancia económica. La magnitud depende esencialmente de la relación entre la cantidad de oxígeno y de dióxido de carbono; varía en proporción inversa a la capacidad de la planta para concentrar dióxido de carbono. Gramíneas tropicales como el maíz, la caña de azúcar y el sorgo muestran una extraordinaria eficacia a este respecto.

Se sabía que el glicolato formado en los cloroplastos por fotorrespiración se oxidaba a glioxilato, con consumo adicional de oxígeno. No se dilucidaría dónde y cómo se daba esa posterior oxidación hasta que se encontró una hidroxiácido oxidasa que actuaba sobre el glicolato en asociación con la catalasa de los peroxisomas del hígado de rata. El descubrimiento animó a N. Edward Tolbert, de la Universidad estatal de Michigan, a vencer varias dificultades que obstaculizaban la homogenización y el fraccionamiento de los tejidos de las hojas verdes. Descubrió entonces que los peroxisomas constituían el lugar de oxidación del glicolato. Como otros representantes de tan versátil familia, los peroxisomas de la hoja se equilibraban a una elevada densidad en un gradiente de densidad de sacarosa y presentaban las características morfológicas de los microcuerpos.

Los microcuerpos de las hojas verdes, objeto de estudio especial por parte de Eldon H. Newcomb y sus colaboradores, de la Universidad de Wisconsin en Madison, son unos orgánulos de singular belleza. Miden hasta 1,5 micrometros de diámetro y no es raro que contengan densos nucleoides, o inclusiones cristalinas, formados, presumiblemente, por catalasa. De acuerdo con Tolbert, el glioxilato producido por oxidación de glicolato se convierte en el aminoácido glicina mediante intervención de un enzima (una transaminasa) de los peroxisomas. La escena se desplaza entonces hacia las mitocondrias, donde dos moléculas de glicina se transforman, por oxidación, en el aminoácido serina más dióxido de carbono. La serina retorna a los peroxisomas, donde se convierte en ácido glicérico, que, tras una fosforilación, contribuirá a la formación de carbohidrato en los cloroplastos. Este circuito se refleja claramente en la disposición morfológica de los peroxisomas de la hoja: con frecuencia se les ve apretados, formando cuñas entre los cloroplastos y las mitocondrias.

En 1968, Charlotte J. Avers, de la Universidad de Rutgers, descubrió microcuerpos que contenían enzimas marcadores peroxisómicos y glioxisómicos en la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. El estudio de cepas de levadura que se desarrollan sobre sustratos no usuales sugiere que su adaptabilidad se debe a ciertas propiedades metabólicas e inducibles de sus peroxisomas.

Saburo Fukui, de la Universidad de Kyoto, y sus colegas advirtieron una notable proliferación de microcuerpos que contenían catalasa en cepas de la levadura *Candida* cultivadas en alcanos, hidrocarburos de cadena larga. Las partículas encerraban catalasa, va-



8. LOS ACIDOS GRASOS se transforman, en los glioxisomas de la plántula, rindiendo acetil coenzima A, el combustible del ciclo del glioxilato y, por tanto, de la gluconeogénesis (la producción de novo de glucosa y otros carbohidratos). La ruta de la beta-oxidación que lleva a cabo esta conversión se inicia con un acil coenzima A, un ácido graso activado: una cadena de grupos CH_2 (algunos representados por *R*, por radical) unidos por un grupo CO a un átomo de azufre del coenzima A. Cada ronda de beta-oxidación elimina dos grupos CH_2 y rinde una molécula de acetil coenzima A. En los glioxisomas (pero no en las mitocondrias, donde también se desarrolla la beta-oxidación) el primer enzima del ciclo genera peróxido de hidrógeno, sello distintivo del metabolismo de la peroxisomas.

FOSFO-GLICERATO CH_2OPO_3 – CHOH – COOH + COOH – CHOH – CH_2OPO_3 FOSFO-GLICERATO ← (CO_2, H_2O) RIBULOSA DIFOSFATO CH_2OPO_3 – C=O – CHOH – CHOH – CH_2OPO_3 → (O_2) FLOSFO-GLICOLATO CH_2OPO_3 – COOH + COOH – CHOH – CH_2OPO_3 FOSFO-GLICERATO → (H_2O) GLICOLATO CH_2OH – COOH

9. EN EL CLOROPLASTO, LA FOTORRESPIRACION compite con la fotosíntesis, en cuyo proceso el dióxido de carbono se fija mediante un enzima que convierte la ribulosa difosfato en dos moléculas de fosfoglicerato (*flechas hacia la izquierda*). En presencia de oxígeno, ese mismo enzima actúa de oxigenasa, desviando parte de la ribulosa difosfato hacia una ruta que rinde una molécula de glicerofosfato y otra de fosfoglicolato (*flecha hacia la derecha*). La hidrólisis del fosfoglicolato produce glicolato. Este, exportado a los peroxisomas, se oxida en glioxilato, que se convierte en glicina. En las mitocondrias, dos moléculas de glicina se transforman para formar serina y dióxido de carbono. De nuevo en los peroxisomas, la serina se convierte en ácido glicérico, que contribuye a la formación de carbohidrato en los cloroplastos.

rias oxidasas, un sistema completo de beta-oxidación, los dos enzimas de la derivación del glioxilato (pero no los otros tres enzimas del ciclo del glioxilato) y enzimas que eliminaban hidrógeno de alcoholes y aldehídos de cadena larga. Las mitocondrias de esos organismos albergan enzimas del ciclo de Krebs y alcohol deshidrogenasas, pero ningún sistema de beta-oxidación. El hallazgo permite pensar que los peroxisomas (con ayuda de las mitocondrias para completar el ciclo del glioxilato) desempeñan un importante papel en la fabricación de carbohidratos a partir de alcoholes de cadena larga, derivados de los alcanos.

Al cultivar la levadura *Hansenula* en un medio con metanol como única fuente de carbono se observa una espectacular adaptación metabólica. Varios grupos de investigadores de Holanda, Alemania y Japón observaron que las células de levadura estaban repletas de grandes microcuerpos, cuyo apretado empaquetamiento formaba una figura casi cúbica. Gran parte del volumen de los microcuerpos aparecía ocupado por una gran estructura cristalina de alcohol oxidasa, enzima que oxida el metanol a formaldehído, generando peróxido de hidrógeno que es eliminado por la catalasa; el formaldehído se convierte posteriormente en carbohidrato, en el citosol, por una ruta especial. Existen pruebas de que las levaduras desarrollan otras adaptaciones metabólicas mediadas por peroxisomas, cuando crecen sobre sustratos nitrogenados como D-aminoácidos, urato, colina o aminas simples.

En mamíferos se ven microcuerpos típicos en muy pocos órganos, en el hígado y el riñón en particular. Estos órganos tienen, además, unos niveles de catalasa mucho mayores que otros tejidos. Sin embargo, en todos los tipos celulares se encuentran pequeñas cantidades de catalasa. Cuando no está en peroxisomas típicos, el enzima parece ir asociado a partículas menores, rodeadas por una membrana, de un diámetro comprendido entre los 0,1 y 0,2 micrometros. Con frecuencia son alargadas y a veces presentan forma de serpiente. Alex y Phyllis M. Novikoff, y sus colaboradores, han denominado microperoxisomas a estas partículas. El número creciente de pruebas a favor de la presencia de oxidasas en estas pequeñas estructuras sugiere que guardan una relación funcional con los peroxisomas, aun cuando difieran morfológicamente de los microcuerpos.

¿Cómo se originan los peroxisomas (o glioxisomas)? ¿Se parecen a las mitocondrias, que se hallan ya en los gametos y dan origen a más mitocondrias por crecimiento y división? ¿O están más cerca de los lisosomas primarios, que surgen por desgajamiento de trozos del aparato de Golgi, que, a su vez, deriva de la red principal de canales membranosos de la célula, el retículo endoplasmático? Muchos citólogos afirman haber visto conexiones entre las membranas de los peroxisomas (o glioxisomas) vegetales o animales y el retículo endoplasmático. Estas observaciones, sumadas a algunos informes anteriores según los cuales la catalasa del hígado se sintetiza sobre ribosomas unidos al retículo endoplasmático (o retículo endoplasmático "rugoso"), inspiraron la hipótesis de que los peroxisomas derivaban del retículo por gemación. Se proponía que las proteínas de los peroxisomas se sintetizaban sobre ribosomas unidos a la membrana, pasaban a la luz del retículo endoplasmático y, desde allí, se transferían a los peroxisomas por canales conectados.

En nuestro laboratorio del Rockefeller, ni Poole, ni Lazarow que lo intentó luego, dieron con prueba alguna en favor del modelo. Sin embargo, Lazarow y sus colaboradores encontraron que las proteínas de la matriz del peroxisoma se sintetizaban en ribosomas libres del citosol. En experimentos en los que se alimentan animales con aminoácidos marcados con un isótopo radiactivo, las proteínas peroxisómicas recién fabricadas (marcadas) se recuperan por completo de la fracción soluble de células de hígado homogeneizadas. Después de una breve estancia (menos de 20 minutos por término medio para la catalasa) en lo que (hasta que haya pruebas de lo contrario) se supone el citosol, las proteínas se transfieren a los peroxisomas por un mecanismo desconocido. Otros investigadores que trabajan con hígado de rata han ofrecido resultados similares. Las principales características de este esquema parecen ser aplicables a la biogénesis de glioxisomas en varias clases de semillas.

El mecanismo de traslocación a través de la membrana del peroxisoma de las proteínas recién fabricadas plantea un problema. Los ribosomas inyectan en el interior del sistema de membranas las proteínas que fabrican en el retículo endoplasmático rugoso. En el caso de proteínas introducidas desde el citosol en el interior de las mitocondrias, la cadena de "pre-proteína" se va acortando a medida que atraviesa la membrana mitocondrial, tal vez proporcionando energía para la transferencia. En ausencia de ribosomas activos que "empujen" las macromoléculas de proteína, como enzimas, al interior de una estructura membranosa, o a falta de un cercenado proteolítico que "tire" de ellas al interior, ¿de dónde procede la energía necesaria? Resulta tentador imaginar un proceso de autoensamblaje, dentro del peroxisoma, en el que las proteínas quedaran ligadas a la membrana de la partícula mediante un mecanismo de unión al receptor, para ser luego arrastradas hacia el interior de la partícula en complejos multiproteicos. En ese sentido, resulta sugestivo

que, con tanta frecuencia, se observen dentro de los peroxisomas densos agregados, a veces de naturaleza cristalina.

Cualquiera que sea la naturaleza del mecanismo de traslocación, hay pruebas de que puede reproducirse en el tubo de ensayo. Si se mezclan con peroxisomas (o glioxisomas) proteínas peroxisómicas (o glioxisómicas) recién sintetizadas en el laboratorio, y marcadas con un isótopo radiactivo, parte de la proteína puede recuperarse del interior de las partículas. Wayne M. Becker, de la Universidad de Wisconsin, ha efectuado ese ensayo con glicoxisomas de plántulas de pepino, y Yukio Fujiki, en el laboratorio de Lazarow, con peroxisomas de hígado de rata.

La traslocación, desde el citosol, de proteínas de la matriz del peroxisoma no excluye la posibilidad de que la membrana de la partícula pueda originarse a partir del retículo endoplasmático, y que incluso permanezca unida a él. Igualmente puede ocurrir, como ha manifestado Lazarow, que las proteínas de la membrana del peroxisoma se sinteticen en ribosomas libres, y luego se inserten en la membrana de peroxisomas ya existentes. Las proteínas de la membrana mitocodrial, e incluso algunas del retículo endoplasmático, se originan así.

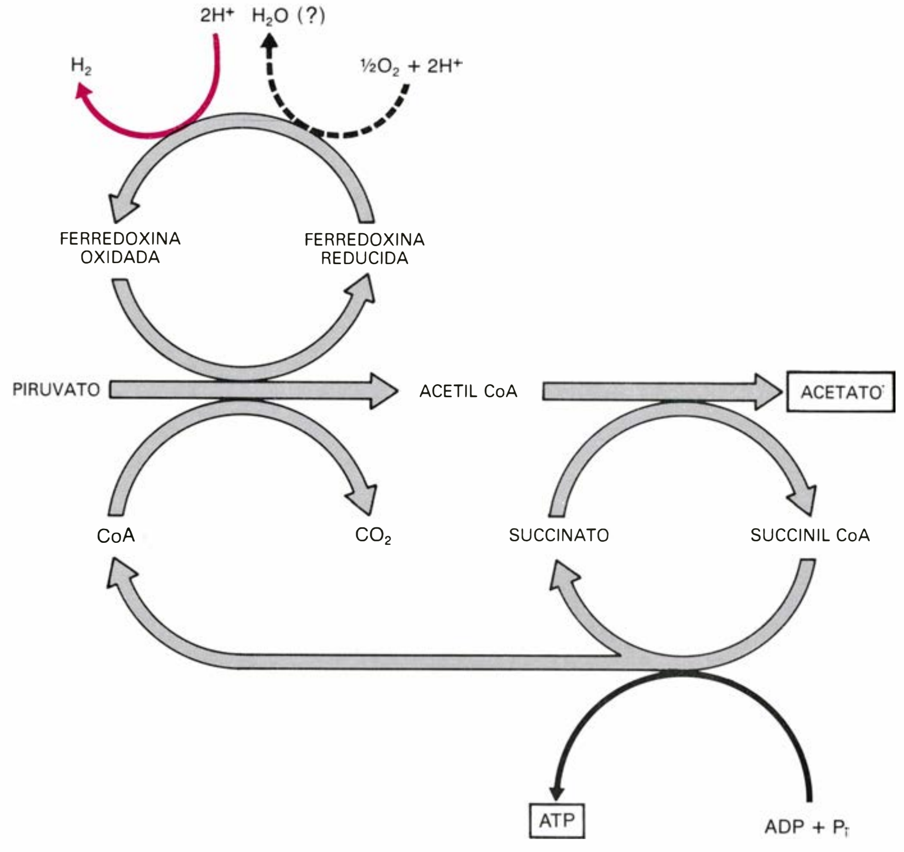
El hecho de que los Novikoff y otros hayan descrito conexiones directas entre los peroxisomas y el retículo endoplásmico parecería un argumento en favor de la primera posibilidad, si no fuera por la dificultad que entraña identificar inequívocamente el retículo endoplasmático sobre una base puramente morfológica. Lazarow y Helen Shio han buscado continuidades tiñendo los productos específicos de los peroxisomas y del retículo endoplasmático. En ningún caso se ha visto tales productos en camino desde una estructura a la otra: no existe comunicación entre la luz de ambas. Lazarow ha demostrado también, con Fujiki y otros, que las membranas de esas dos estructuras tienen una composición química muy diferente.

Ante estos hechos debería considerarse la posibilidad de que lo que parece un sistema de conexiones con el retículo endoplásmico sea, en realidad, un sistema que une los peroxisomas a alguna clase especial de "retículo peroxisómico" (expresión de Lazarow) o de "compartimento de microcuerpos" (según K. Gorgas, de la Universidad de Heidelberg). Pruebas de la existencia de tal compartimento, al menos en ciertos tipos de células, las han logrado investigadores de Alemania y Portugal, quienes han combinado la tinción con un sistema de cortes seriados. Ese tipo de reconstrucción no se ha realizado todavía con células de hígado, pero la disposición arracimada típica de los peroxisomas del hígado y su notable homogeneidad bioquímica nos han sugerido, desde hace tiempo, que también ahí los microcuerpos podrían estar interconectados. Queda para futuros trabajos la elucidación de esta importante posibilidad.

Se han hallado partículas identificadas bioquímicamente como peroxisomas o glioxisomas en una amplia variedad de células, en toda clase de organismos superiores a las bacterias. Tanto si las partículas pertenecen a vegetales, hongos, protozoos o invertebrados, como si corresponden a animales superiores, muestran tantas similitudes y superposiciones de toda clase, que pueden considerarse miembros de una misma familia. Por mor de simplicidad, de ahora en adelante usaré el nombre único de peroxisomas. ¿Por qué? Los glioxisomas, enteros o no, comparten las propiedades principales de los peroxisomas, en tanto que lo contrario no siempre es verdad. Llamarlos a todos ellos microcuerpos, por otro lado, podría inducir a error. Como veremos, no todos los microcuerpos son peroxisomas.

Los peroxisomas de diferentes organismos y tejidos albergan diversas dotaciones enzimáticas, que se solapan. La lista de enzimas, siempre creciente, incluye ya más de 40 enzimas distintos. Hasta ahora no se ha encontrado ningún peroxisoma que contenga todos los enzimas de la relación; cabe preguntarse si ello se debe a la carencia de ciertos genes o meramente a su represión, tan notable es el grado de inducibilidad manifestado por muchos enzimas peroxisómicos.

Dos características se muestran constantes en toda la diversidad funcional de los peroxisomas. Ocurre así con la asociación de oxidasas productoras de peróxido de hidrógeno con la catalasa, dato al que los peroxisomas deben su nombre. Los sustratos de esta actividad oxidante son numerosos y variados: aminoácidos (tanto D como L), hidroxiácidos, ácidos grasos, alcoholes, aminas y una purina, pero no el principal



10. UN MICROCUERPO INUSUAL: el hidrogenosoma. Se descubrió en *Trichomonas foetus*, un protozoo parásito que carece de mitocondrias. Los hidrogenosomas albergan enzimas que oxidan el piruvato en el proceso que genera adenosín trifosfato (ATP), portador celular de energía. Los electrones eliminados del piruvato se transfieren a la proteína transportadora de electrones ferredoxina y, finalmente, al oxígeno, si lo hay (*flecha negra a trazos*), probablemente para formar agua. En ausencia de oxígeno, los electrones se transfieren a protones (H^+), proceso que rinde hidrógeno molecular (*flecha de color*).

transportador de electrones, la forma reducida del nicotinamida-adenín-dinucleótido (NADH). Parece que cualquier electrón entregado al NAD^+ (la forma oxidada del transportador) en el peroxisoma debe canalizarse hacia las mitocondrias para su empleo en la oxidación. Alternativamente, podrían cederse, en el citosol, a un potencial sustrato peroxisómico, como lactato o etanol, y así retornar a los peroxisomas para su uso final. No se ha encontrado todavía ningún mecanismo de recuperación de energía asociado a las oxidaciones peroxisómicas.

La segunda función que se repite, cual estribillo metabólico de los peroxisomas, es la gluconeogénesis. Ya he mencionado su existencia en semillas oleaginosas en germinación, en *Tetrahymena*, en las hojas de plantas con fotorrespiración y en levaduras que crecen sobre alcanos o metanol. En los propios mamíferos sorprende, como nos ocurrió hace algunos años, que los peroxisomas aparezcan primordialmente en los principales sitios de la gluconeogénesis, es decir, el hígado y el riñón; pero hasta el momento no hay pruebas de que participen en la neoformación de carbohidratos en esos tejidos.

La amplia distribución de los peroxisomas en los principales grupos de eucariotas (organismos con células dotadas de núcleo) indica que los orgánulos existían en aquel organismo unicelular primitivo supuestamente antepasado común de todos los eucariotas. El carácter rudimentario y el despilfarro energético del aparato respiratorio de los peroxisomas abonan la sospecha de que éstos precedieron a las mitocondrias en el organismo ancestral.

Si los peroxisomas llevaban a cabo el metabolismo oxidativo en alguna célula primitiva desprovista de mitocondrias, existe la posibilidad de que aquella línea celular original haya sobrevivido hasta la fecha. Esta idea impulsó a Müller a buscar protozoos sin mitocondrias, aunque dotados de microcuerpos. Eligió los tricomonadinos, un grupo de flagelados que, además de poseer unos microcuerpos hermosos y carecer de mitocondrias, revisten gran importancia económica y médica como parásitos del tracto genital de animales y de personas y como agentes de enfermedades transmitidas por contacto sexual.

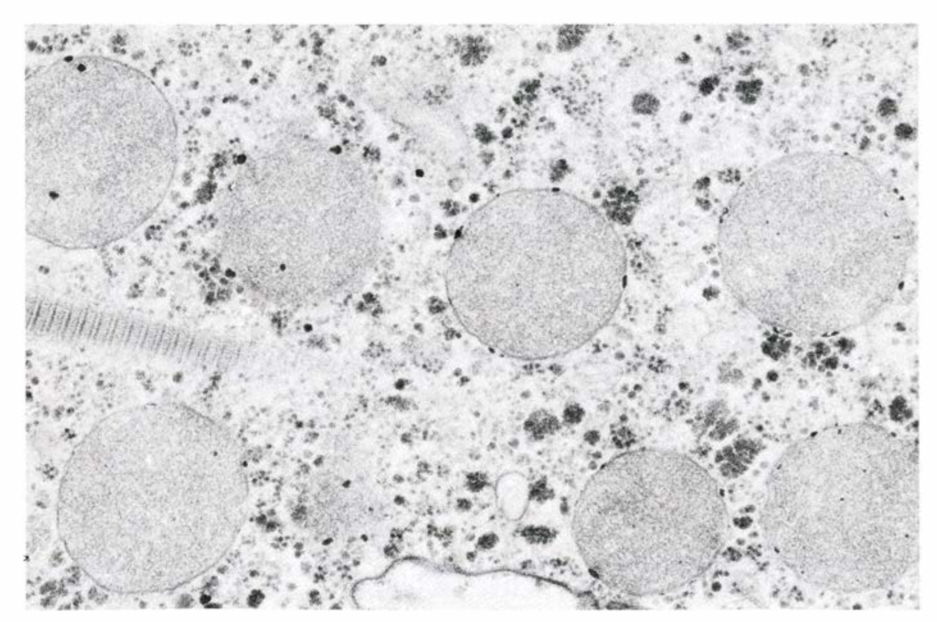
Müller, junto con Donald G. Lindmark, hoy en la Universidad de Cornell, aisló y caracterizó los microcuerpos tricomonátidos. Sin embargo, no encontró lo que andaba buscando. En lugar de descendientes de un peroxisoma ancestral, halló hidrogenosomas: orgánulos capaces de oxidar el piruvato en acetato y dióxido de carbono. La oxidación estaba acoplada a la síntesis de ATP; los electrones liberados por la oxidación se transferían al oxígeno, si lo había. En condiciones anaeróbicas, los electrones, en cambio, se transferían a protones (H^+) para formar hidrógneo (H_2).

Los hidrogenosomas deben su capacidad de producir hidrógeno a que poseen la hidrogenasa apropiada y una proteína especial transportadora de electrones (una ferredoxina con un bajo potencial de óxido-reducción) que sirve de aceptor de electrones para el enzima piruvato deshidrogenasa. La feredoxina permite también a los hidrogenosomas reducir ciertos derivados nitroimidazólicos de bajo potencial y así convertirlos en compuestos altamente tóxicos para la célula. Esta propiedad puede volverse en contra de su poseedor; las drogas nitroimidazólicas se han convertido en el tratamiento convencional de las infecciones por tricomonas. La selección natural no ha fallado en su contraofensiva, y Müller sigue ahora la pista a cepas patógenas que se han hecho resistentes a las drogas disponibles.

Además de su considerable interés biológico, el descubrimiento de los hidrogenosomas contribuye así a la guerra contra lo que se ha convertido en la enfermedad venérea más extendida de Occidente. Y una vez más debo puntualizar a los que financian y planifican la investigación científica, que Müller no había previsto incorporarse a esta causa de salud pública; ni siquiera pretendía comprender la producción de hidrógeno en los tricomonas. Buscaba un antiguo peroxisoma, cuando, al final del camino, se encontró con un hidrogenosoma. Hasta ahora no se ha hallado ningún parentesco bioquímico entre los dos tipos de partículas; posiblemente no estén relacionadas.

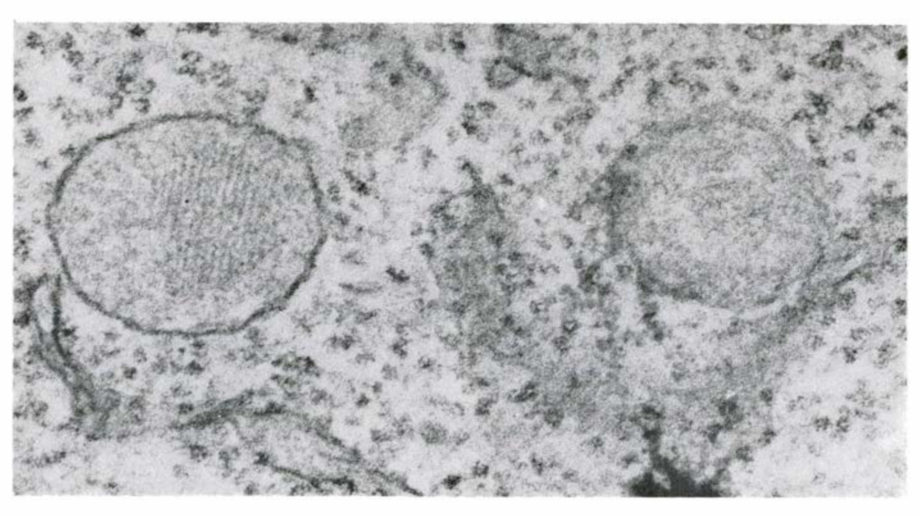
El más reciente de los peroxisomas lo descubrió Fred R. Opperdoes en el laboratorio de Piet Borst, de la Universidad de Amsterdam. Detrás de sus credenciales morfológicas, perfectamente legitimadas, se ocultaba el escondrijo de un gran segmento de la cadena glicolítica, la principal ruta metabólica para la degradación de la glucosa en compuestos carbonados más pequeños. Se ha comprobado que numerosos protozoos parásitos de la sangre (incluidos los agentes de la enfermedad africana del sueño, la terrible enfermedad iberoamericana de Chagas y la leishmaniasis de muchas partes del mundo) albergan este inusual orgánulo. Se le ha denominado glicosoma.

En todas las demás células animales investigadas hasta hoy al respecto, los enzimas de la cadena glicolítica se hallan libres en el citosol; encontrar gran parte de este sistema secuestrado dentro de una partícula limitada por una membrana resulta, ciertamente, bastante extraño. En aerobiosis, los glicosomas colaboran con las mitocondrias supliendo las necesidades energéticas de las células donde se encuentran. Pueden también proporcionar energía



11. HIDROGENOSOMAS de *Trichomonas vaginalis*, aumentados 40.000 diámetros en esta micrografía tomada por Shio. Los objetos grandes y densos son rosetas de glucógeno, una forma de almacenamiento de glucosa. El objeto estriado situado a la izquierda es una estructura en forma de costilla, la costa.

por sí mismos en ausencia de oxígeno, o si la ruta oxidativa de las mitocondrias está bloqueada por el ácido salicil hidroxámico. Sus enzimas poseen propiedades fisicoquímicas muy diferentes de las que definen a los enzimas glicolíticos usuales, aun cuando catalizan la mayoría de las mismas reacciones. Los glicosomas constituyen, pues, un blanco vulnerable ante productos químicos que interfieran selectivamente con sus enzimas especiales; tales productos químicos podrían servir de drogas para combatir las terribles enfermedades causadas por los parásitos portadores de glicosomas. (De nuevo la investigación básica tiene aplicación práctica. Opperdoes dirige la unidad de enfermedades tropicales del Instituto Internacional de Patología Celular y Molecular que hemos establecido en Bruselas, para facilitar específicamente este tipo de desarrollo o intercambio científico.) Los glicosomas, a pesar de su similitud morfológica con los microcuerpos de las células vegetales y animales, son bioquímicamente muy diferentes de los peroxisomas y probablemente no estén relacionados con ellos.



12. SUELEN SER LOS GLICOSOMAS de un tamaño menor que los demás microcuerpos. Pierre Baudhuin nos los ofrece aquí aumentados unas 105.000 veces. Las partículas aparecen dentro de *Trypanosoma brucei*, un protozoo parásito de animales domésticos en Africa; se transmite por la mosca tsetsé.

Una explicación sencilla en su presentación, y ampliamente aceptada, sobre el origen evolutivo de los microcuerpos es considerarlos retoños, o brotes nuevos, del sistema principal de citomembranas. Pero como he indicado ya, gran parte de lo que se conoce sobre la biogénesis de los peroxisomas y los glioxisomas (no hay información al respecto para los hidrogenosomas o glicosomas) no apoya tal origen. Lo que se ve en el caso de los peroxisomas –la transferencia de proteínas, después de traducidas, a través del citosol– recuerda, por el contrario, la ruta biogenética de muchas proteínas que, codificadas en el núcleo, se sintetizan en el citoplasma y luego se introducen en mitocondrias y en cloroplastos; estos orgánulos aparecen rodeados por una doble membrana, y, en opinión de muchos biólogos, derivan de endosimbiontes. Viene a decirse que pequeñas células bacterianas, con la capacidad respectiva de realizar la fosforilación oxidativa y la fotosíntesis, fueron englobadas por un antecesor primitivo de las actuales células eucariotas, y que se desarrolló entre ambas una relación simbiótica, hasta que, finalmente, los invasores se transformaron en orgánulos. Surge, inmediata, la pregunta: ¿Proceden también los microcuerpos de endosimbiontes?

La prueba más sólida en que se apoya dicho origen, en el caso de las mitocondrias y los cloroplastos, estriba en que ambos orgánulos poseen su propio ADN, que especifica algunas de sus proteínas, y la maquinaria genética para replicarlo, transcribirlo a ARN y traducir el ARN en proteína. Hace años se publicó el hallazgo, en hidrogenosomas, de algo que parecía ser ADN; sin embargo, Müller no ha podido confirmar bioquímicamente ese supuesto: no existen pruebas de que ninguno de los microcuerpos posea su propio sistema genético. Un argumento secundario en favor de un origen simbiótico de las mitocondrias y de los cloroplastos sostiene que ambos orgánulos están rodeados por una doble membrana; la más externa podría ser la reliquia de la membrana de una vacuola que, en otro tiempo, albergó al simbionte bacteriano original. Los microcuerpos (excepto los deshidrogenosomas) están rodeados por una membrana simple.

Estos argumentos negativos no constituyen una prueba irrefutable en contra de un origen endosimbióntico de los microcuerpos. Las mitocondrias y los cloroplastos han perdido, en favor del núcleo, más del 90 por ciento de su información genética; ¿acaso no podría ser la pérdida del 100 por ciento en el caso de orgánulos aceptados como endosimbiontes en época más temprana? En cuanto al argumento de la doble membrana, no todos los endoparásitos quedan encerrados en una vacuola. Algunos están desnudos en el citoplasma.

Lo que confiere su atractivo a la hipótesis del endosimbionte, amén del argumento bioquímico antes mencionado, es el carácter "primitivo" –uno se siente tentado a escribir "bacteriano"– de las funciones metabólicas en las que colaboran los microcuerpos. Parece que la cadena glicolítica se cuenta entre los sistemas enzimáticos más antiguos, anterior a la fotosíntesis, cuando virtualmente no había oxígeno en la atmósfera: quizá haya persistido, dentro del glicosoma, en una forma particularmente antigua. La capacidad de reducir protones a hidrógeno molecular, característica del hidrogenosoma, puede pertenecer también a los tiempos anaeróbicos primitivos; se ha conservado de una manera similar en *Clostridium*, un grupo de bacterias anaerobias en el que se encuadra el agente de la gangrena gaseosa. Como el peroxisoma, podría representar una de las primitivas adaptaciones de protección ante la aparición del oxígeno. Un tipo de respiración simple, peroxisómica no fosforilante, pudo haber precedido a la forma fosforilante más avanzada, propia de algunas bacterias y las mitocondrias. Una cualidad final de los peroxisomas, característica a su vez de las bacterias, es la fácil adaptación que muestran para aprovechar nutrientes no usuales.

Pero se trata de argumentos muy endebles. Al abordar acontecimientos ocurridos hace más de mil millones de años, los sucesos probados son escasos y la imaginación vuela sin freno. Si vale la pena mencionar la posibilidad de que los microcuerpos se originasen como simbiontes es porque la hipótesis puede ponerse a prueba. Cabe determinar la secuencia de aminoácidos de las proteínas de los microcuerpos (o la secuencia de nucleótidos de los genes que las codifican) para luego compararlas con la secuencia de moléculas homólogas de diversas células eucariotas y bacterianas. El grado de parentesco que se deduzca nos informará de los antepasados de los microcuerpos.

Ciencia y sociedad

Fiebre aftosa

España padece actualmente una epidemia –o epizootia, en terminología veterinaria– de fiebre aftosa o glosopeda. Según estimaciones de la Sección de Sanidad Animal de la Generalidad de Cataluña, la enfermedad ha ocasionado, considerando solamente la provincia de Lérida, pérdidas por valor de 1500 millones de pesetas. A escala mundial, la fiebre aftosa es una de las enfermedades de mayor resonancia económica y constituye uno de los objetivos prioritarios de las investigaciones que se realizan tanto en centros oficiales como en industrias privadas en materia de sanidad.

La enfermedad afecta primariamente a animales de pezuña hendida, en particular al ganado bovino y porcino. Otras especies pueden también resultar afectadas y, aunque muy infrecuentemente, también el hombre. Se caracteriza por la aparición de lesiones, o aftas, en pies y boca. Los animales experimentan dificultades para desplazarse e ingerir alimentos, lo que ocasiona un deterioro general con pérdida de peso. En la reciente epidemia, la mortandad ha sido elevada, aunque habitualmente no lo sea, salvo entre animales jóvenes que suelen sufrir una miocarditis. La enfermedad es muy contagiosa y, en pocas semanas, puede transmitirse por un territorio de la extensión de la Península Ibérica.

El agente causante de la enfermedad es un *Aftorius* de la familia de los *Picornavirus*, de características semejantes al virus causante de la poliomielitis en el hombre. La organización del virus de la fiebre aftosa es simple: una molécula de ácido ribonucleico (ARN) de unos 8000 nucleótidos de longitud, cubierto por cuatro proteínas estructurales presentes cada una en 60 copias por partícula. El virus tiene la notable propiedad de ofrecer un gran polimorfismo, provocado por las mutaciones que, con elevada frecuencia, se incorporan al ARN vírico durante su replicación en los animales infectados. Como ilustración de este hecho, cabe destacar que al someter a análisis químicos detallados los ARN de aislados distintos, recogidos en Granollers (Barcelona) durante un brote de enfermedad, se detectaron varias diferencias –o mutaciones– entre ellos. La variabilidad les confiere adaptabilidad a distintos hospedadores y ambientes. Concretamente, con cierta frecuencia surge una mutación que dota al virus de resistencia a la inactivación por parte de los anticuerpos presentes en animales vacunados. Por esta razón han fracasado campañas de vacunación en varias partes del mundo.

¿Hay vacunas eficaces para prevenir la fiebre aftosa? En España se fabrican vacunas por virus inactivado que se han mostrado eficaces para la prevención de la enfermedad. Persisten, no obstante, dos problemas, de índole muy distinta, que no permiten un control eficaz de la fiebre aftosa: la falta de planificación de las campañas de vacunación y la no disponibilidad de una vacuna de amplio espectro, capaz de evitar la enfermedad desencadenada por los distintos virus circulantes. Del primer problema cabe decir que constituye un ejemplo más de la deficiente estructura sanitaria del país. A menudo los focos de enfermedad no son detectados o declarados a tiempo. Animales enfermos son trasladados a los mataderos diseminándose el virus durante los viajes. Las vacunas no se administran periódicamente, con independencia de la presencia o no de la enfermedad.

En cuanto a la preparación de vacunas de mayor eficacia, actualmente se están investigando en el mundo dos nuevos procedimientos cuyos resultados han sido, hasta ahora, esperanzadores. La síntesis de proteína vacunal por ingeniería genética y el diseño y síntesis de oligopéptidos inmunogénicos. El gen vírico que codifica la proteína inmunogénica ha sido clonado y producido en bacterias. Se está investigando su capacidad para generar anticuerpos protectores en animales susceptibles. Estos experimentos han permitido, además, delimitar una pequeña zona de la proteína vírica inmunogénica capaz, aisladamente, de inducir anticuerpos. Péptidos sintéticos que reproducen la secuencia de aminoácidos de dicha zona se están experimentando, con notable éxito, como vacuna. En España se ha clonado en bacterias y secuenciado la proteína inmunogénica de uno de los virus de tipo C_1 que son frecuente causa de enfermedad. Aunque el grupo implicado en estos estudios gasta anualmente en el proyecto una milésima parte de lo que habrá costado la enfermedad en Lérida este año, existe la esperanza de que, también en nuestro país, se produzcan en el futuro vacunas de mayor pureza y eficacia. No es posible, de momento, hablar de una próxima erradicación de la fiebre aftosa, como se ha escrito en la prensa diaria. Solamente países con un estricto control de las importaciones de carne y ganado o con campañas sistemáticas de vacunación están libres de la enfermedad. En España, brotes como el padecido actualmente no son más que la punta del iceberg. El virus es enzoótico, está siempre presente y amenazante con su continua variación. De vez en cuando surge el variante capaz de causar la epidemia de proporciones catastróficas que azota a nuestra ganadería.

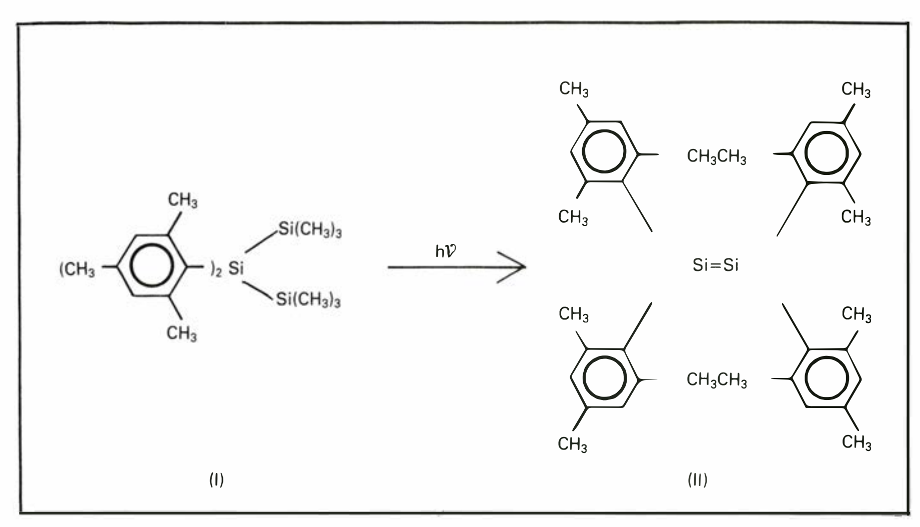
Química silicoorgánica

El silicio es, después del oxígeno, el elemento más abundante en la corteza terrestre y, según parece, el sexto en el universo, después del hidrógeno, el helio, el oxígeno, el carbono y el nitrógeno. Descubierto en 1810 por Jöns Jacob Berzelius ha adquirido hoy una importancia industrial enorme, principalmente por sus aplicaciones en metalurgia y en electrónica en la fabricación de materiales semiconductores.

El silicio pertenece a la familia IV A del sistema periódico de los elementos, encabezada por el carbono. Como es sabido, los átomos de este último pueden unirse entre sí trabando cadenas de longitudes diversas y formas múltiples, capacidades esenciales para la existencia de la vida. Y aunque tanto el carbono como el silicio son *tetravalentes* –es decir, poseen cuatro valencias o engarces para unirse con otros átomos–, hasta hace poco se consideraba que el silicio no poseía capacidad de unirse consigo mismo, como el carbono. En esta intrigante cuestión se han centrado los éxitos de Robert West, de la Universidad de Wisconsin en Madison.

Efectivamente, West ha logrado sintetizar cadenas moleculares (cíclicas) constituidas por 35 átomos de silicio unidos entre sí [L. F. Brought, K. Matsamura y R. West, *Angew. Chem., Internat. Ed. Engl.*, **18**, 955 (1979)]. Sin embargo, hasta hace unos dos años, se creía que la capacidad del silicio para unirse a sí mismo se limitaba a los "enlaces sencillos"; es decir, los enlaces constituidos por dos electrones, con es-

pines opuestos, compartidos por los dos átomos implicados en tales uniones, que en química se representan formalmente con un guión entre los símbolos que representan a aquéllos. Así, las cadenas (lineales) de átomos de carbono se escriben ...-C-C-C-C-C-C-..., y las de West, referidas anteriormente, ...-Si-Si-Si-Si-Si-Si... Sin embargo, el carbono posee también la capacidad de unirse con otros átomos –en particular, consigo mismo– mediante "enlaces dobles", como en los etilenos, en los cuales las uniones están constituidas por dos pares de electrones compartidos. Tal unión se representa mediante dos guiones (C=C). Los enlaces dobles, juntamente con los sencillos, los triples y los aromáticos, constituyen la base estructural de la química orgánica, y sobre ella se desarrolla la bioquímica y se apoya la existencia de la vida.



*1. La fase crucial de la síntesis del tetramesitildisileno (***molécula de la derecha***) es la fotólisis del 2,2-bis (mesitil)-hexametiltrisilano (***molécula de la izquierda***)*

Durante más de setenta años y hasta hace poco, todos los intentos dirigidos hacia la síntesis de homólogos silícicos de los etilenos (los disilenos), en cuya estructura aparecería la unión Si=Si, fracasaron totalmente. No obstante, West ha anunciado recientemente [R. West, M. J. Fink y J. Michel, *Science,* **214**, 1343 (18 de diciembre de 1981)] la síntesis y aislamiento del primer disileno conocido, el *tetramesitildisileno* (II), merced la aplicación del concepto de protección estérea (o blindaje) de los centros químicamente activos de la molécula –en este caso, los dos átomos de silicio doblemente enlazados–, creando un apiñamiento de átomos alrededor de los mismos. Este concepto fue aplicado por el autor de estas líneas y sus colaboradores en el descubrimiento de los "radicales libres inertes" del carbono trivalente [M. Ballester, "La Química Percloroorgánica", *Investigación y Ciencia*, **3**, 90 (diciembre de 1976)]. La fase crucial de la síntesis de aquel disileno es la fotólisis del 2,2-bis (mesitil)-hexametiltrisilano (I), irradiándolo en solución con luz ultravioleta, a la temperatura de 100 °C bajo cero.

El tetramesitildisileno (II), cuyo enlace doble está protegido del ataque desde el exterior de su molécula por seis grupos metilo (CH_3) y tres anillos bencénicos, es un sólido cristalino de color anaranjado que resiste sin descomposición temperaturas por encima de su punto de fusión (176 °C). A la síntesis de este disileno han seguido otras, realizadas por otros autores [S. Masamune *et al., J. Am. Chem. Soc.*, **104**, 1150 (1982)].

El tetramesitildisileno posee propiedades químicas (adiciones) y espectrales (resonancia magnética nuclear) parecidas a las de los etilenos, siendo los cuatro enlaces restantes de la unión Si=Si aproximadamente coplanares; es decir, que se hallan cerca de un mismo plano geométrico.

Una parte importante de los materiales orgánicos en los que nos hallamos inmersos, tanto de naturaleza u origen biológico como industrial, son polímeros: es decir, sustancias constituidas por moléculas de gran tamaño, constituidas a su vez por módulos estructurales repetitivos, provenientes de otras moléculas de tamaño relativamente pequeño (monómeros). Pues bien, West y sus colaboradores han logrado sintetizar polímeros resultantes de la concatenación de más de 3000 átomos de silicio [R. West *et al., J. Am. Chem. Soc.,* **103**, 7352 (1981)], que actualmente son objeto de estudio en relación con su posible aplicación en electrónica, particularmente en el diseño y construcción de nuevos y mejores circuitos integrados, los constituyentes de la llamada "inteligencia artificial".

Desde el siglo pasado, se viene especulando continuamente acerca de la existencia de vida en otros lugares del universo. Se ha apuntado asimismo la posibilidad de un tipo diferente de vida basada en el elemento silicio en vez del carbono. Ciertos dibujos de ciencia ficción nos han mostrado "silicoorganismos vivos" bajo el aspecto de gigantescos y terroríficos crustáceos. Sin embargo, a pesar de que esto último parece aún más remoto que la propia vida extraterrestre, existen interesantes posibilidades de aplicación en los organismos vivos de los compuestos silicoorgánicos, con la incorporación extensa del silicio en ellos, consecuencia de los avances que se esperan realizar en un futuro próximo. En este punto, se desea recordar la existencia de multitud de organismos, tanto animales como vegetales, que han asumido la presencia de silicio con sus esqueletos en proporción substancial, y también que los polímeros sintéticos llamados *siliconas*, caracterizados por estar constituidos de moléculas en cuyas cadenas alternan átomos de silicio y de oxígeno (...-O-Si-O-Si-...), se emplean actualmente en prótesis quirúrgicas.

West y su grupo están empeñados en la ampliación de las bases sintéticas y estructurales de la química silicoorgánica. Concretamente, están investigando la hipotética síntesis de sistemas aromáticos de silicio, imágenes del benceno y otros compuestos afines. Este objetivo y la síntesis de compuestos con enlaces tripes Si≡Si –que corresponden a los acetilenos de la química de carbono– de lograrse representarían nuevos hitos de gran valor en el desarrollo de la química. (Manuel Ballester.)

Contaminación atmosférica y corrosión de los metales

Se da el nombre de corrosión atmosférica de un material a la reacción entre ese material y el medio ambiente en el que está inmerso, reacción que origina una transformación superficial de ese material que puede entrañar a la larga una destrucción parcial o total del mismo.

Aplicado el término "corrosión" a una pieza de un equipo industrial o a un recubrimiento de esa pieza puede significar: que esa pieza puede todavía seguir cumpliendo su misión, que debe ser utilizada con cuidado o que su uso entraña peligro inminente de rotura o

fallo total del equipo del que forma parte.

El comportamiento ante la corrosión atmosférica de un material puede considerarse como una propiedad conjunta del material y de ese medio ambiente. De este modo, podemos diferenciar comportamientos diferentes de un mismo material según esté expuesto a un tipo de atmósfera u a otro. Y, por otra parte, para un mismo tipo de atmósfera, el comportamiento variará según sea la clase de material expuesto.

Los materiales industriales más utilizados hasta el presente por el hombre han sido los metales, y de entre ellos el hierro y el acero. La forma de corrosión más común y familiar para él será, pues, el óxido u orín formado sobre la superficie de este metal.

La mayor parte de los metales expuestos al aire se recubren de una fina película de óxido, película que, por lo general, alcanza un espesor límite que puede conferirle en algunos casos una protección contra el avance de la corrosión. Tal es el caso, por ejemplo, de la película invisible que se forma por acción de la atmósfera sobre la superficie de los siguientes metales industriales: aluminio, silicio, cromo, níquel y estaño, o aleaciones como el acero inoxidable al cromo. Esta película pasivadora se puede formar también cuando algunos metales entran en contacto con ciertos compuestos químicos, como es el caso del plomo en contacto con el ácido sulfúrico, con formación de sulfato de plomo que lo protege de un ulterior ataque por parte de este ácido. Cuando esa fina película de óxido formada espontáneamente por la acción atmosférica sigue creciendo y sobrepasa cierto espesor límite, se va produciendo la corrosión oxidativa del metal y el consiguiente desmoronamiento de su estructura.

La corrosión oxidativa que se produce sobre la superficie del metal está causada por un gran número de pares galvánicos formados sobre una superficie. Cada célula galvánica es una pequeña batería eléctrica con una corriente eléctrica que fluye desde el polo anódico hasta el polo catódico, produciendo una cantidad proporcional de corrosión, oxidándose el metal a iones positivos en las áreas anódicas del mismo.

En el caso del metal hierro, la reacción es muy simple: $Fe \rightarrow Fe^{++} + 2\,e$. A medida que los iones metálicos se mueven por la superficie del metal y encuentran iones (aniones) hidroxilo en el electrólito circundante, van formando precipitados de productos de corrosión. En el caso del hierro, el precipitado inicial es el hidróxido ferroso, siendo la reacción completa la siguiente:

$$Fe + 2\,OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 + 2\,e$$

pasando después, según sean las condiciones del medio ambiente, a la forma más oxidada de hidróxido férrico hidratado, conocido como orín o herrumbre.

El grado de humedad y la composición de la atmósfera que circunda al metal son los principales factores que determinan la magnitud de la corrosión atmosférica de ese metal. En lo que atañe a la humedad, es decir, existencia de partículas de agua en la atmósfera, cabe decir que a partir de un valor crítico, correspondiente a condiciones de condensación, la corrosión atmosférica aumenta de modo considerable. En lo que atañe a la composición de la atmósfera que rodea el metal, cabe destacar su importancia sobre los parámetros de la corrosión. Así, cuando la superficie de un material metálico se expone a una atmósfera que contenga solamente vapor de agua sin ninguna partícula extraña, esa superficie se recubre de una película de agua muy delgada. Ahora bien, si en esa atmósfera está presente además cualquier sustancia higroscópica que pueda depositarse conjuntamente en la película, entonces ésta aumenta de espesor, pudiendo calificarse ya las condiciones como "acuosas", aumentando la agresividad de la película de humedad condensada. De este modo, pequeñas partículas de esas sustancias higroscópicas, además de partículas diminutas de polvo de ceniza o de carbón procedentes de la combustión u otros orígenes, actúan como puntos de nucleación del ataque corrosivo de esa atmósfera.

Si por el mero hecho de contener vapor de agua, oxígeno y dióxido de carbono posee toda atmósfera cierto carácter corrosivo para ciertos metales, es lógico suponer que cuando esa atmósfera está contaminada por diversos agentes químicos, como el azufre y sus compuestos (dióxido de azufre principalmente), óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, etcétera, su poder corrosivo queda considerablemente aumentado. Si la presencia de estas sustancias en la atmósfera fuera esporádica o estuviera en concentraciones bajas, ello no constituiría un peligro continuo notable para los metales; ahora bien, cuando en intervalos cortos de tiempo se arrojan a la atmósfera cientos de toneladas de esas sustancias, como ocurre en zonas industriales o industriales-urbanas, la capacidad natural de dispersión del aire queda colapsada, pudiendo entonces llegar a producir (ayudado muchas veces por la presencia de niebla baja) brumas sumamente corrosivas.

La acción agresiva de los óxidos de azufre, gaseosos, citados sobre los metales se explica porque, al estar disueltos en el vapor de agua y condensarse sobre una superficie metálica determinada, esa superficie cataliza su oxidación desde el estado tetravalente (SO_2) al estado hexavalente (SO_3), dejando finalmente en libertad, al existir una película de agua, al peligroso ácido sulfúrico (H_2SO_4). Por otra parte, puede ocurrir también que el azufre y compuestos de azufre depositados sobre esa superficie metálica, pero no oxidados, reaccionen con ella formando sulfuros, los cuales o bien son parcialmente oxidados a sulfato o bien estimulan la reacción anódica de oxidación del metal, aumentando así su velocidad de corrosión.

Otro tipo de contaminante no atribuible al hombre, de origen natural, lo constituye la presencia en el aire de ion cloruro, especialmente en determinados lugares (zonas costeras o de alta mar) y, en algunos casos, en zonas relativamente alejadas de la costa cuando el viento dominante arrastra las partículas salinas desde el mar hacia el interior. Los iones cloruro, en suspensión en ese aire marino, al depositarse sobre los objetos metálicos inician focos de corrosión localizados, incluso en metales generalmente resistentes a la corrosión atmosférica habitual, como pueden ser: el aluminio anodizado o el níquel y el cromo, produciendo, a la larga, profundas hoquedades ("picaduras") en esos metales.

Dado que la contaminación y la humedad atmosférica no suelen ser constantes, ni siquiera en una misma zona geográfica, sino que suelen poseer un alto grado de variabilidad y, dado que algunas de las reacciones que se producen en la superficie de un metal están condicionadas en gran medida por el compuesto agresivo existente en el aire y por la reacción del metal con el anión correspondiente, resulta muy difícil generalizar acerca de las reacciones de los metales y aleaciones en las distintas atmósferas existentes (rural, urbana, industrial, marina, tropical, urbano-industrial, urbano-marina, industrial-marina y tropical-marina). Vamos, sin embargo, a referirnos al comportamiento de tres de los principales metales industriales, hierro, níquel y aluminio, al ser expuestos a la acción de la atmósfera. En lo que respecta al metal

hierro, las partículas suspendidas en el aire, al depositarse sobre su superficie, en presencia de humedad, actúan como núcleos para la formación del óxido u orín. A partir de esos puntos, las manchas de orín se extienden de manera irregular, estableciendo contacto unas con otras; después, la velocidad de formación de herrumbre se mantiene casi constante. Otras veces, este orín no se desarrolla en forma de manchas, sino siguiendo trayectorias relativamente rectas, que cambian de dirección al aproximarse unas a otras, sin llegar a cruzarse. Esta corrosión "filiforme" se produce al absorber agua el núcleo salino original y recubrirse éste de una membrana de óxido férrico hidratado, la cual se rompe en algún punto debido al aumento de volumen dentro de esa membrana, originándose un nuevo punto de ataque y prosiguiendo éste en una dirección rectilínea.

El níquel, que en la mayor parte de los casos se utiliza como recubrimiento protector del hierro o acero, al ser expuesto a la atmósfera se recubre de una ligerísima película, formada por la acción del ácido sulfúrico presente en el aire contaminado; esta acción origina sulfato de níquel, que "empaña" la superficie de este metal y después se transforma en sulfato básico de níquel. Este "empañado" de la superficie del metal niquel se acusa de modo extraordinario en atmósferas sulfurosas. Para evitarlo se suele proteger la capa de níquel mediante una fina película de cromo, que conserva inatacada durante mucho tiempo la superficie de níquel.

En lo que respecta al aluminio, la superficie de este metal sufre, ya desde el comienzo de su exposición a la atmósfera, un ataque ligero que luego cesa; sólo continúa de manera intensa y localizada, formándose profundas "picaduras" u hoyos en su superficie, bajo condiciones en que no exista oxígeno (en resquicios, y también cuando se acumula una gran cantidad de partículas de polvo).

La contaminación atmosférica, teniendo en cuenta solamente su pernicioso efecto sobre los metales industriales, presenta una factura extraordinariamente cara al hombre actual. Las pérdidas económicas son bien evidentes: desgaste de bienes materiales, pérdidas por desgaste de materiales metálicos en instalaciones, pérdidas por paros en procesos, pérdidas por accidentes debidos a fallos en esas instalaciones, etcétera. Las cifras que se barajan relacionadas con esas pérdidas se cuentan por miles de millones de pesetas anuales en países de tan sólo mediana categoría industrial, como es el caso español.

A conocer de manera más profunda los agentes contaminantes atmosféricos y a intentar localizarlos en cada zona geográfica con objeto de dar a los materiales metálicos industriales allí expuestos la protección más adecuada contra esos agentes, ha tendido la investigación en estos últimos cincuenta años en la mayoría de países industriales. Dentro de esta investigación, se han confeccionado los denominados mapas de corrosividad atmosférica, mapas que, mediante niveles de corrosión o mediante zonas señaladas con trazos o colores, informan sobre un plano acerca de la susceptibilidad o riesgo de corrosión existente en cada uno de los puntos estratégicos de esa zona para diversos metales. Por la elevada influencia que sobre la corrosión atmosférica poseen los parámetros dependientes de la contaminación atmosférica (sobre todo la contaminación debida a dióxido de azufre y a cloruros) en cada zona geográfica, en la confección de estos mapas se ha tenido en cuenta la concentración en la atmósfera de estos contaminantes, además de otros (como sulfuro de hidrógeno o dióxido de nitrógeno) que circunstancial o permanentemente puedan existir. (E. Julve.)

Avances en la producción porcina

El cerdo aporta cerca del 25 por ciento de la energía y del 9 por ciento de la proteína que los seres humanos obtienen de origen animal. La colaboración entre biología y economía ha originado un nuevo sistema de porcinocultura

Wilson G. Pond

En la mente de mucha gente persiste la idea del cerdo como un animal que hoza en la tierra en busca de alimentos, que se revuelca en el barro y se nutre de los desperdicios y sobras de la cocina. No es éste el cerdo de la moderna industria porcina. Vive sus días estabulado: nace en una unidad de parto y se engorda hasta el sacrificio en una unidad de acabado. Se alimenta con una dieta establecida por ordenador y compuesta por harinas de maíz y soja, con suplemento de proteínas, minerales y vitaminas. A menos que se destine a la cría, se sacrifica a los cinco o seis meses de edad, con 100 kilogramos de peso. En los Estados Unidos, uno de los principales países productores de cerdo, se sacrificaron en 1980 cerca de 97 millones de cabezas, por un valor de 8900 millones de dólares.

Todos los cerdos, salvajes y domésticos, son miembros de la familia de los Suídos, que a su vez pertenece al orden mamífero de los Artiodáctilos. El cerdo doméstico procede del cerdo salvaje europeo o jabalí (*Sus scrofa*), que aún medra en muchas regiones. Excepto los verracos viejos, que viven solitarios, los jabalíes viven en grupos. Son noctámbulos y omnívoros, hozan en busca de raíces y tubérculos, comen frutos y nueces del suelo, así como una gran variedad de insectos, reptiles, pájaros y micromamíferos. El jabalí tiene a la cruz unos 90 centímetros, y está dotado de una espesa capa de fuertes cerdas. Es buen corredor y nadador.

El origen de su domesticación se pierde en la historia. Un estudio sitúa la primera domesticación conocida del cerdo, en lo que es ahora Irak, alrededor del 6750 a. de C. Un investigador chino asegura que en su país había cerdos domesticados en el 2900 a. de C. Probablemente el atractivo del cerdo como animal doméstico radicara en que es un eficaz carroñero y come una amplia variedad de alimentos. Esa sigue siendo su función en muchos países en vías de desarrollo.

En la moderna industria agropecuaria, el interés del ganado de cerda se centra en su eficacia en la transformación del alimento. El cerdo de hoy gana casi medio kilogramo de peso por cada kilo y medio de pienso que consume. Hace 50 años requería casi dos kilogramos para idéntico fin. En términos de calorías, el rendimiento del ganado de cerda es superior al del vacuno, ovino y aves. Su producción, al igual que la de vacuno, ovino y aves, se basa en el beneficio económico que le rinde al agricultor vender su cosecha transformada en carne animal, en vez de hacerlo en forma de productos vegetales para el consumo humano directo.

Para el consumidor, la carne de cerdo es de alto valor nutritivo. Algo más de 100 gramos de magro aportan unas tres cuartas partes de las necesidades de un adulto en hierro y tiamina, de un cuarto a un tercio de los requerimientos de niacina, vitamina B_6 y vitamina B_{12}, la mitad de las proteínas y la mayoría de los oligoelementos. En Norteamérica y Europa, el consumo anual de cerdo es de unos 27 kilogramos por persona. La media mundial, sin embargo, se sitúa por debajo de los nueve kilogramos por persona. Dado que la demanda de proteína animal en la dieta aumenta linealmente con los ingresos medios per cápita de un país, las disparidades geográficas en el consumo de carne de cerdo reflejan fielmente la enorme desigualdad de las rentas entre países.

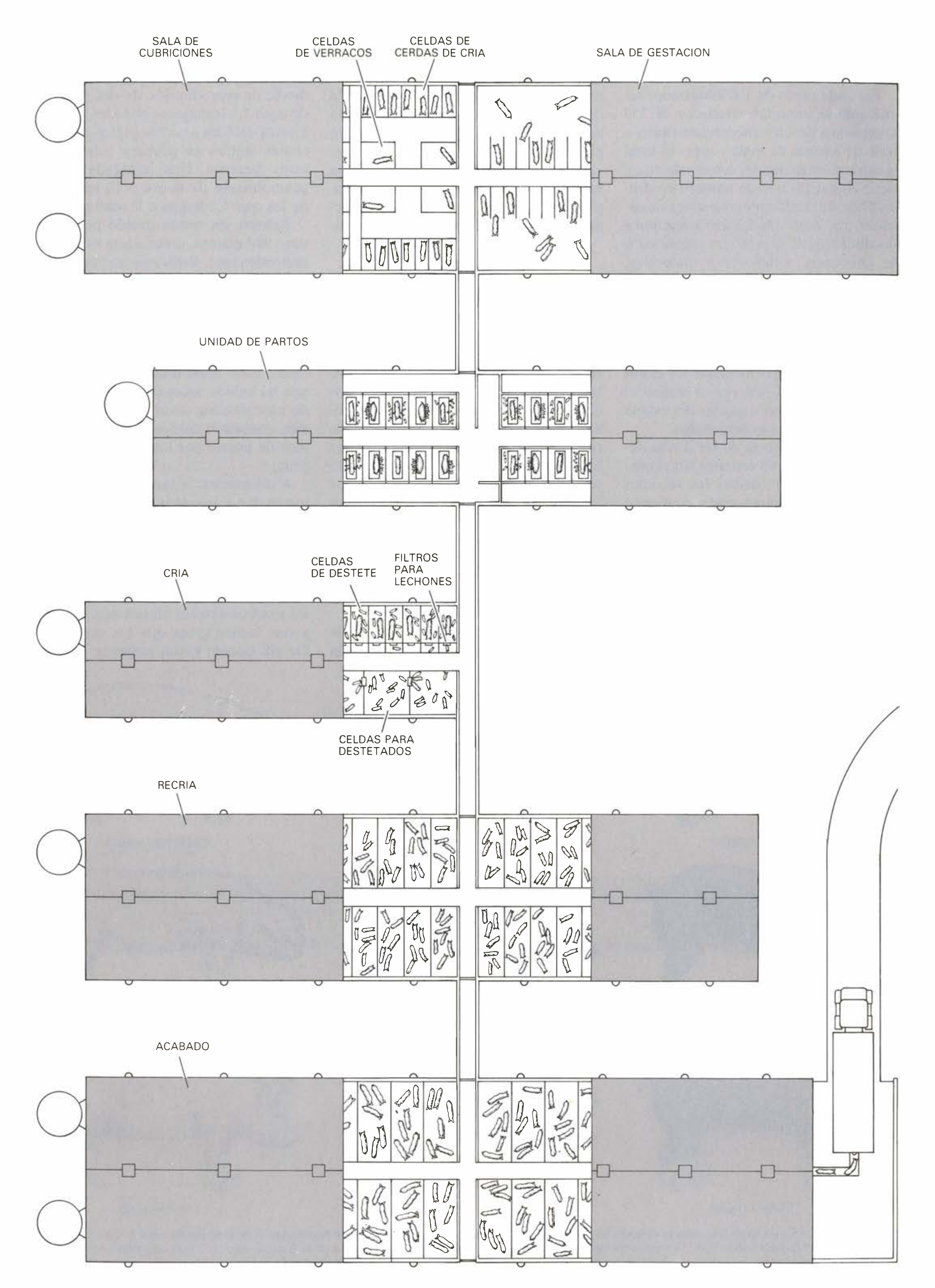
Prácticas modernas

La carestía de la mano de obra, la elevación del valor de la tierra, la rentabilidad superior de las tierras aradas sobre las dejadas para pastos, la posibilidad de mantener una dieta mejor controlada y la lucha más eficaz contra las enfermedades y los parásitos impulsaron el abandono de la zahurda en favor de la instalación del cerdo en un medio cuidadosamente controlado. Una granja que críe cerdos desde el nacimiento hasta su sacrificio, lo que se da hoy cada vez con mayor frecuencia, suele incluir una unidad para hembras gestantes, otra unidad de paridera, una tercera de cría y una nave de acabado. Todas tienen suelos emparrillados que facilitan la limpieza. En las granjas de clima templado, todas las unidades, excepto, quizá, la de acabado, tienen calefacción.

Allí la misión central consiste en echarle la comida para su engorde, operación que supone del 55 al 85 por ciento del coste total de la producción comercial porcina. Las variaciones resultan de los costes relativos del pienso, mano de obra e instalaciones, de una granja a otra, o de los cambios de una estación a la siguiente. El coste del alimento depende de su disponibilidad local, de la competencia por determinado alimento de consumo humano, o de otro animal doméstico, y de los precios de los suplementos proteicos, vitamínicos y minerales.

El sistema digestivo del cerdo es similar al humano. De ahí que los intereses dietéticos del ganadero entren en competición con los de la población humana de su contexto. El grado de competencia depende de las diferencias culturales en las preferencias alimentarias. Por ejemplo, en los Estados Unidos no se echa trigo ni patatas a los cerdos, ya que la demanda para consumo humano de esos productos hace que sus precios sean muy elevados; en otras partes del

1. UNIDAD DE RECLUSION TOTAL, que acoge a los animales desde su nacimiento hasta que se envían al mercado. Se trata en este caso de un complejo de cinco instalaciones, de arriba abajo, con secciones destechadas para mostrar el interior. En la unidad de parto nacen los lechones y maman, mientras la madre permanece en un brete metálico para evitar que al revolcarse los aplaste. En las unidades de cría, engorde y acabado, los cerdos se alimentan con dietas cuidadosamente formuladas para que alcancen el peso de sacrificio, 100 kilogramos o más, a la edad de cinco o seis meses. Se llevan entonces al mercado.


SALA DE CUBRICIONES
CELDAS DE VERRACOS
CELDAS DE CERDAS DE CRIA
SALA DE GESTACION
UNIDAD DE PARTOS
CRIA
CELDAS DE DESTETE
FILTROS PARA LECHONES
CELDAS PARA DESTETADOS
RECRIA
ACABADO

mundo, por contra, el cerdo encuentra en el comedero su ración habitual de trigo y patatas.

Por cada cerdo de 100 kilogramos sacrificado se invierten alrededor de 350 kilogramos de un concentrado típico a base de harinas de maíz y soja. El total incluye el consumo del rebaño de cría y tiene en cuenta que un número no desdeñable de cerdos mueren antes de alcanzar ese peso. De los 350 kilogramos de alimento, de 45 a 90 son suplemento de proteínas, vitaminas y minerales, necesarios para cubrir las carencias del maíz y otros cereales. Las necesidades nutritivas del animal en las distintas fases de producción se han determinado con tal precisión que los fabricantes de piensos pueden hoy formular las dietas por ordenador. Cada vez es mayor el número de granjeros que las determina con sus ordenadores personales.

Aunque la mayoría de las dietas tienen al maíz y otros cereales sin procesar por alimento básico, las raciones formuladas a mínimo coste contienen cada vez mayores proporciones de subproductos: salvados de trigo y maíz, granos y solubles de destilerías y harinas de sangre, de carne y de huesos de los mataderos. Tales subproductos encerrarían escaso valor si no se empleasen en los piensos y, seguramente, su eliminación elevaría considerablemente el precio de mercado del producto final.

También se sabe hoy que algunos forrajes, así la alfalfa, pueden entrar en la dieta del porcino, sobre todo de la hembra gestante. La reproducción no parece verse afectada, según recientes ensayos, aun cuando la dieta contenga hasta un 96 por ciento de alfalfa, siempre que el otro 4 por ciento sean suplementos proteicos y vitamino-minerales.

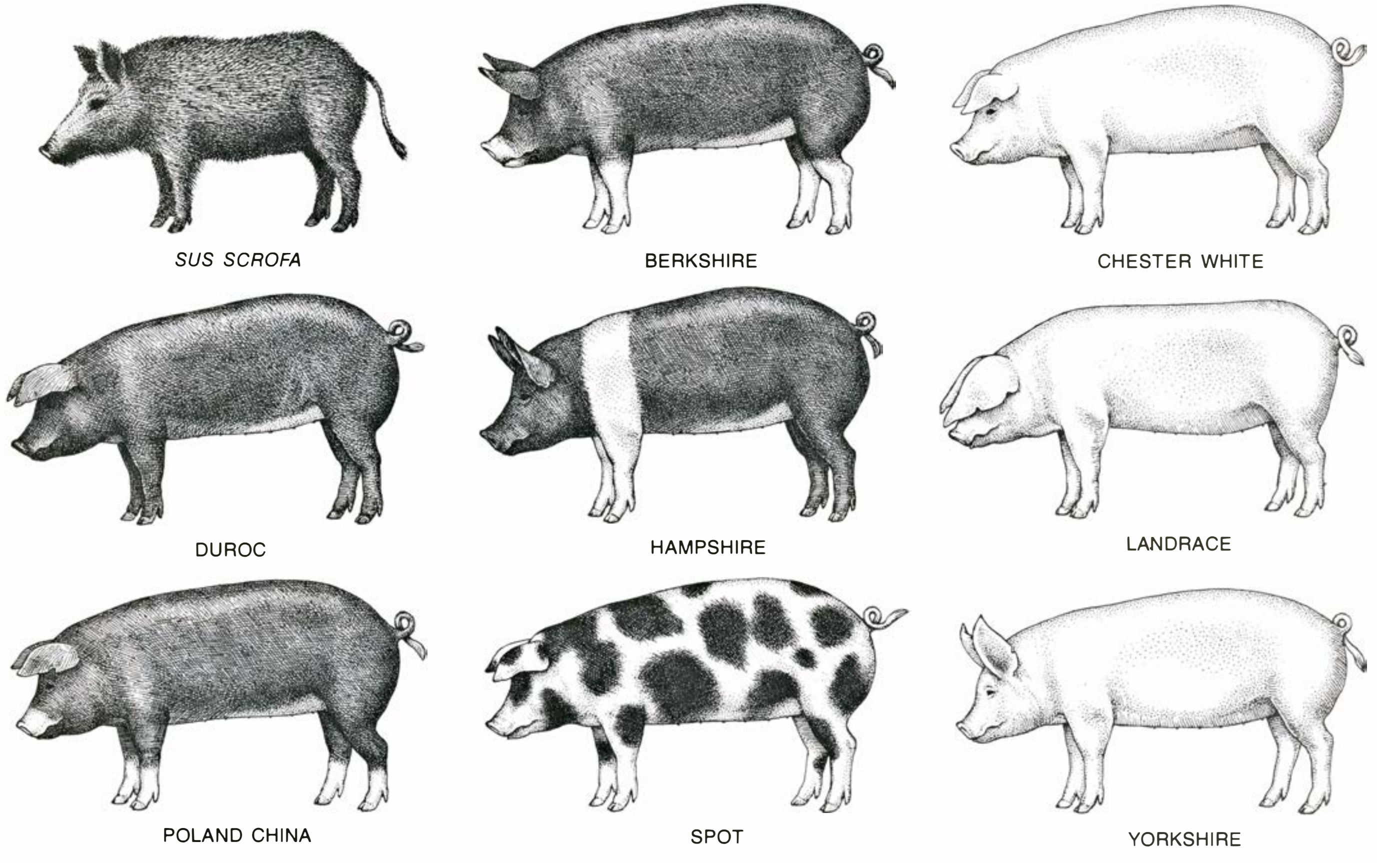
Biología del cerdo

El calendario anual de la granja debe ajustarse al ciclo biológico del cerdo. Aunque éste alcance su madurez sexual a los cinco o seis meses de edad, conviene retrasar la primera cubrición hasta los ocho meses, cuando haya adquirido un tamaño mayor y se haya desarrollado más su fisiología. La gestación dura unos 114 días y la lactación en las hembras se prolonga otras seis u ocho semanas. El período estral es de unos 21 días; se repite a todo lo largo del año. La gestación detiene el ciclo ovárico, que también se inhibe en la lactancia, cosa que no ocurre en el vacuno. El ciclo ovárico se reanuda 10 días después del destete, que suele ocurrir a las cuatro o seis semanas de vida.

El desarrollo natural de la hembra le permite completar su primera gestación al año de edad, y que lleve a término un máximo de 2,7 ciclos de reproducción y lactación al año. En la práctica, la tasa media de reproducción de una piara es de unas 1,8 lechigadas por año, tras los ajustes debidos a cerdas vacías, concepciones fallidas en primera cubrición y otros factores. Una lechigada consta generalmente de nueve o 10 lechones, de los que 7,2 llegan a la madurez.

Aunque un recién nacido pesa sólo unos 900 gramos, crece a una velocidad impresionante, doblando normalmente su peso en la primera semana, que será el triple al final de la segunda. Suele acercarse a los siete kilogramos a finales de la tercera semana. El peso de sacrificio, de 100 a 108 kilogramos, se alcanza a los cinco meses de edad, aunque ha habido animales que han llegado a los 90 kilogramos en menos de 120 días comiendo menos de dos kilogramos de pienso por kilo de ganancia de peso.

A los machos se les castra en los primeros días o semanas de vida, para evitar que la carne adquiera el sabor de verraco, rechazado por el consumidor. Sin embargo, la castración puede retardarse hasta mucho más tarde con los mismos efectos; importa resaltar que los machos enteros crecen más deprisa y con menos grasa que los castrados. De ahí que en varios países se esté in-



2. RAZAS PURAS a partir de las cuales se obtienen los híbridos que pueblan la mayoría de las granjas comerciales. Se representa también al antecesor del cerdo, el jabalí europeo (*Sus scrofa*). La Berkshire y las demás razas puras que aquí se muestran constituyen la reserva genética con la que efectúan la mayoría de los cruces en los Estados Unidos. Unos pocos países crían principalmente razas puras, como la Landrace, que predomina en Dinamarca.

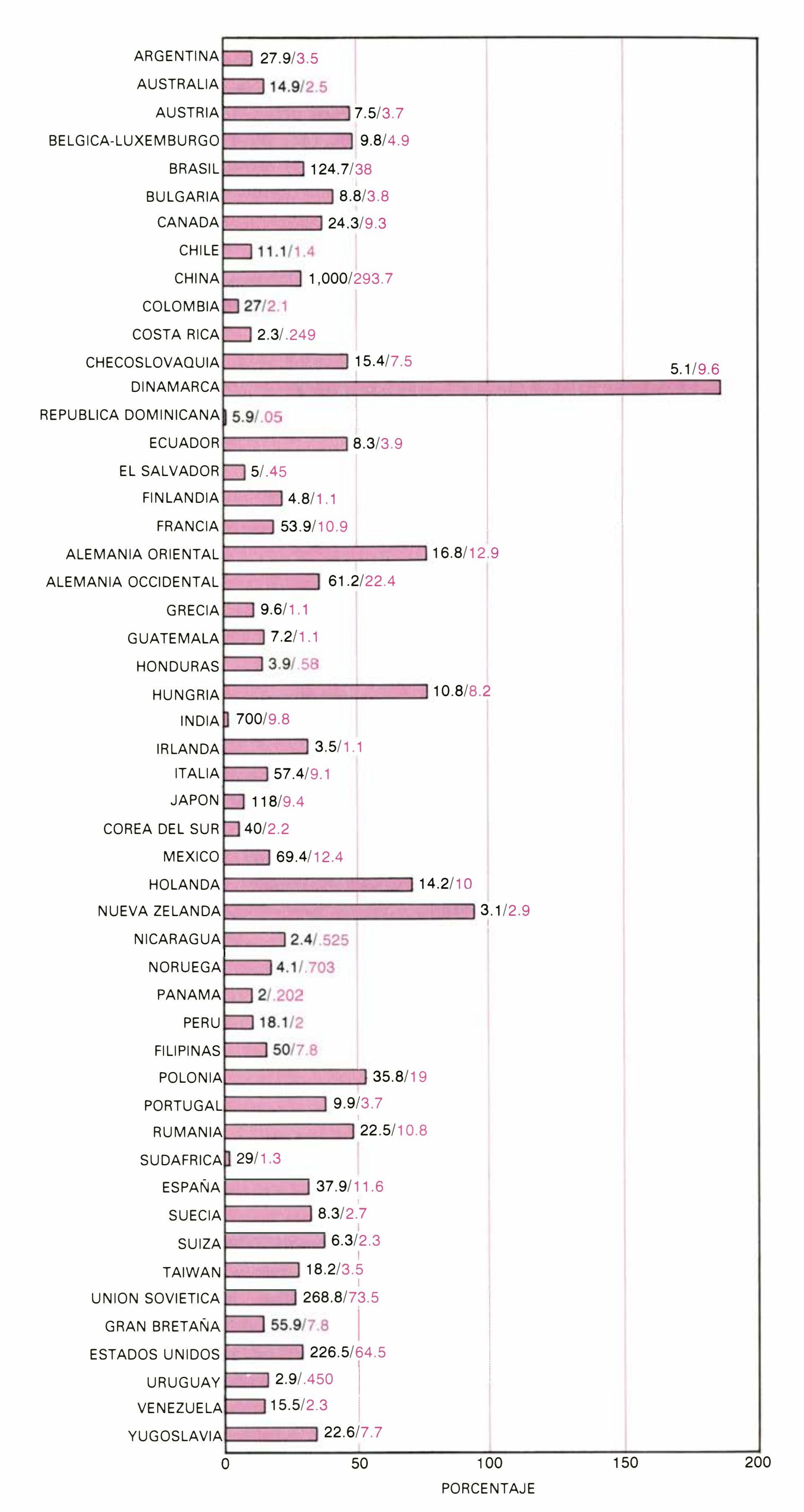
vestigando la manera de conseguir verracos maduros que produzcan carne sin ese sabor desagradable. A menudo, los granjeros retrasan la castración con objeto de tener tiempo para elegir los mejores ejemplares para sementales.

Papel del cruzamiento

La base genética para la mejora racial en rasgos de interés económico la constituye un grupo de poblaciones de raza pura que representan menos del 10 por ciento de la población porcina de la mayoría de países. Hay excepciones, como Dinamarca, donde la mayoría de los cerdos producidos son de raza Landrace. En el resto del mundo desarrollado, unas cuantas razas proporcionan sementales para una industria cárnica que se funda en el cruzamiento. En los Estados Unidos, por ejemplo, unas ocho razas cumplen ese papel. Landrace aparte, recordaremos la Berkshire, Chester White, Duroc, Hampshire, Poland China, Spot y Yorkshire. La mayoría de las razas porcinas que hoy abastecen el sector proceden de Estados Unidos o Gran Bretaña. La Yorkshire norteamericana es similar a la Large White de Europa, y la Landrace americana es similar a la escandinava.

De dos a cuatro cruzamientos híbridos, según un programa sistemático, aportan hoy casi el 90 por ciento de todo el cerdo consumido en un año. Los cerdos cruzados son superiores a los parentales puros en aspectos económicos tan interesantes como la tasa de crecimiento, tasa de supervivencia, aprovechamiento de los alimentos, producción de leche y tamaño de lechigada. El cruzamiento es un método valioso para obtener heterosis, o vigor híbrido: la media de producción de la descendencia es superior a la de los parentales puros. El continuo progreso de la producción porcina por hibridación depende de la selección intensiva de razas puras que porten los caracteres hereditarios adecuados.

Algunas granjas porcinas norteamericanas funcionan según el sistema empresarial "del nacimiento al sacrificio", en el que el cerdo pasa toda su vida en una misma instalación. Otras son "recriadoras", que engordan el cerdo desde las ocho o 10 semanas (poco después del destete) y los venden a los "finalizadores", que los llevan hasta el peso de sacrificio. En ambos casos deben efectuarse algunas operaciones de rutina: corte de incisivos, que de otra forma herirían a la madre al mamar; inyección de hierro, desinfección del ombligo; marcaje de las orejas con muescas, para identificación, y corte del rabo, por-



3. MAGNITUD DE LA PRODUCCION porcina, según sugiere su comparación con la población humana. Los números en negro representan la población humana de cada país y, los de color, la población porcina, ambas en millones. La barra representa el número de cerdos como porcentaje de la población humana. La comparación es algo inexacta debido a las variaciones en la "tasa de extracción", o sea, la proporción de cerdos sacrificados al año con respecto a los presentes en cualquier momento. Por ejemplo: en Estados Unidos esa tasa es de 1,5, mientras que en Brasil es de 0,4. Ilustración de Ilil Arbel.

que los cerdos tienen tendencia a morderse el rabo unos a otros.

Las granjas también desarrollan programas de vacunaciones contra enfermedades infecciosas, tratamientos contra parásitos, internos y externos, programas de cubriciones y de desviejes para mantener la eficacia reproductora y optimizar el uso de las instalaciones y programas de venta para maximizar los ingresos netos. Una granja con animales de raza pura debe, además, llevar un control detallado y preciso de la identidad genética de sus animales. Se ocupará de programas eficaces de publicidad y ventas, para que otros ganaderos sepan lo que el granjero ofrece para cruzamiento. Una empresa de finalización plantea menos problemas, y no requiere tanta mano de obra, pero ha de estar atenta al mercado para no tener un exceso o un defecto de ejemplares en un momento dado.

4. ANATOMIA DEL CERDO, representada esquemáticamente en estas ilustraciones del esqueleto, la musculatura principal y los órganos internos. También aparece una breve relación de los términos más empleados en carnicería, aunque en éstos es frecuente la existencia de variantes de carácter local.

Tarea de máxima delicadeza en toda granja es la concerniente al cuidado de la salud de los animales. Los cerdos son vulnerables a múltiples enfermedades infecciosas, metabólicas y alimentarias. Los modernos avances en la prevención y el control parasitario han rebajado la factura que el ganadero había de pagar antes al veterinario. Esos avances han puesto énfasis en la prevención de enfermedades mediante vacunaciones, para evitar las infecciones, control de los parásitos y restricciones en los movimientos de ganado de una explotación a otra. Muchas empresas comerciales de porcino mantienen un ganado relativamente libre de enfermedades, restringiendo el tráfico humano y animal, y poniendo en cuarentena los animales recién llegados; en el léxico ganadero esas piaras se conocen como SPF (*specific-pathogen-free*), libres de gérmenes patógenos específicos.

Algunas enfermedades metabólicas provocan aún elevadas pérdidas financieras, incluso en ganaderías bien gestionadas. Pensemos en el síndrome del stress porcino, que va asociado a grupos genéticos y razas específicas. O en el complejo metritis-mastitis-agalactia, un síndrome multifactorial causante de muchas bajas entre los lechones recién nacidos.

Las enfermedades relativas a la nutrición son hoy menos comunes de lo que solían, pero aún se dan algunas, a pesar de las modernas técnicas de formulación de dietas. Por ejemplo, una carencia aguda de selenio y vitamina E provoca bastantes muertes en algunas regiones de los Estados Unidos, y en cualquier parte donde el bajo contenido de selenio del suelo determine una deficiencia de este elemento en las plantas que sobre él crezcan. A medida que se detectan síndromes carenciales, la industria prepara suplementos apropiados. En los Estados Unidos no puede a veces añadirse un suplemento al pienso sin la autorización de la Administración de Drogas y Alimentos (FDA). (En España, ese control corresponde al Ministerio de Sanidad.) El selenio es un ejemplo, ya que se le conocía por sus propiedades tóxicas antes de que se le reconociera como nutriente esencial; la FDA autoriza la adición de selenio inorgánico a la dieta de los

cerditos a razón de 0,3 partes por millón.

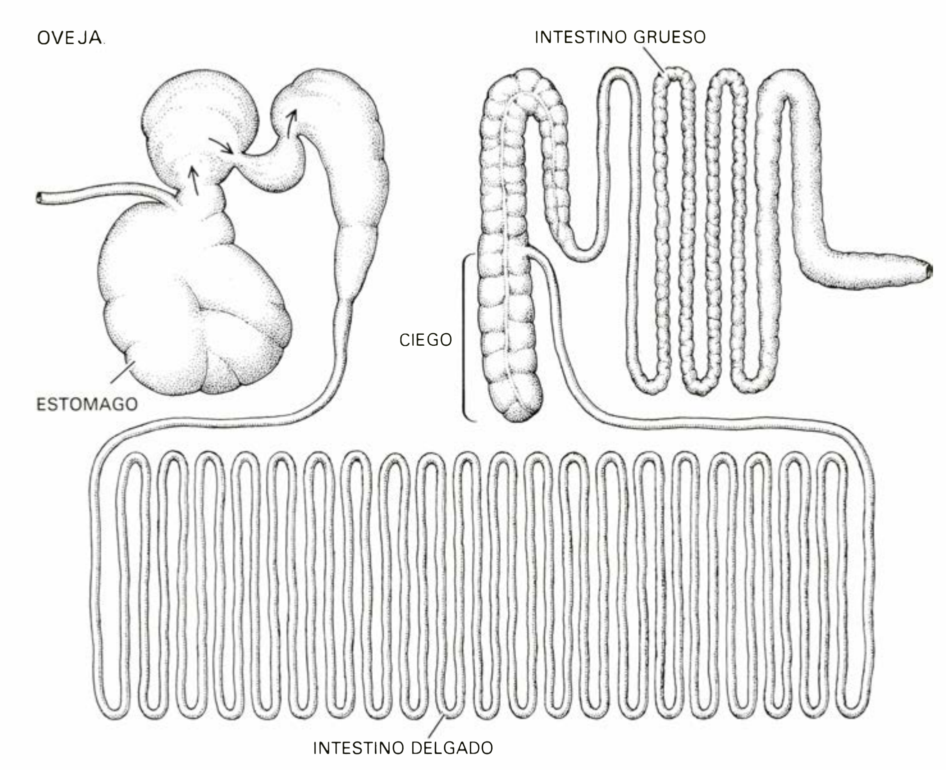
Perspectivas

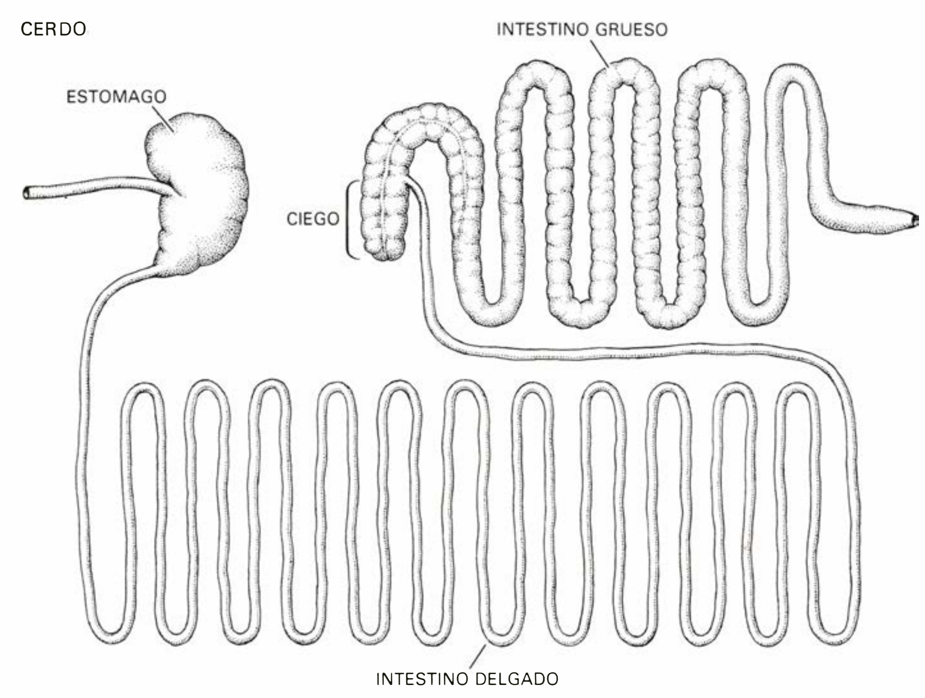
Aunque la industria porcina ha sufrido profundos cambios en los últimos 30 años merced a los avances en tecnología agrícola, conocimientos biológicos y medicina veterinaria, parece probable que las investigaciones actuales en biología aporten nuevos cambios. Estos pueden enumerarse bajo los epígrafes de genética, nutrición y reproducción.

En el primero, los genetistas de poblaciones buscan mejores caracteres hereditarios por medio de programas de cruzamientos, haciendo uso de refinadas técnicas de modelos que ponen a su alcance los modernos ordenadores, e introduciendo sementales genéticamente diferentes en los cruzamientos. Gran parte de la investigación llevada a cabo por genetistas del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos pretende depurar caracteres de reconocida importancia en la industria ganadera y hallar otros nuevos.

Las técnicas para estimar con precisión la composición corporal de los animales vivos, medición por ejemplo del espesor de la grasa dorsal por ultrasonido, y para predecir la composición corporal subsiguiente de un animal a través de mediciones realizadas en las primeras fases de la vida posibilitan una selección más eficaz de los caracteres buscados: el contenido magro de la canal, entre otros. La ingeniería genética, mediante técnicas como la de recombinación de ADN, promete abrir nuevas áreas a la producción bacteriana a gran escala de hormonas del cerdo. Con hormona del crecimiento producida así, el ganadero lograría que sus cerdos alcanzaran el peso de sacrificio en menos tiempo. Se estudia ya el empleo de una hormona del crecimiento obtenida por esos medios para la regulación de la secreción láctea y del crecimiento del tejido muscular en algunos animales de interés ganadero, entre ellos el cerdo.

La variabilidad genética de algunos caracteres de interés comercial, el crecimiento y la lactación entre ellos, está relacionada con hormonas, enzimas y determinados procesos intracelulares. Las bases genéticas de esas relaciones no se conocen con precisión. El cultivo de células musculares en laboratorio, junto con otros estudios *in vitro* empeñados en la comprensión de la síntesis y degradación de proteínas y lípidos, ofrecen la posibilidad de comprobar los procesos metabólicos que controlan la acumulación de tejido muscular en el cerdo y en otros animales.

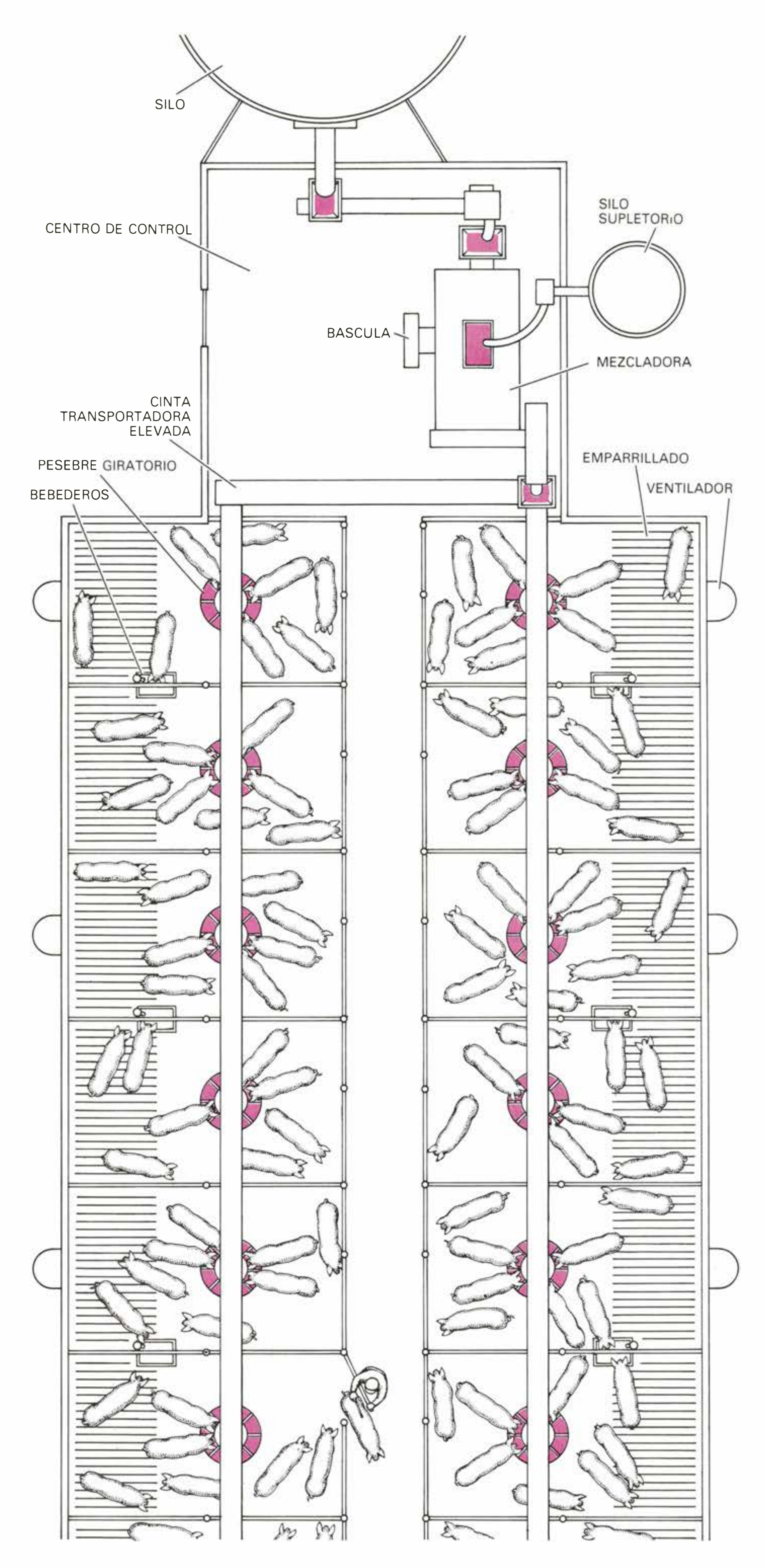




5. SISTEMAS DIGESTIVOS de la oveja y del cerdo. La oveja es un rumiante, dotada de un gran estómago con cuatro compartimentos: rumen, retículo, omaso y abomaso (panza, redecilla, bonete y cuajar). El sistema se ha adaptado a la digestión de la celulosa. La hierba ingerida pasa primero al rumen, luego se regurgita y se rumía; se traga de nuevo y pasa por las otras tres secciones del estómago. El cerdo es omnívoro, aunque apenas si digiere la celulosa. La investigación actual pretende explotar las técnicas de recombinación de ADN para alterar la actividad de la microflora del tracto gastrointestinal del cerdo, de modo que actúe sobre plantas fibrosas, lo que aumentaría sus fuentes de alimento.

En nutrición, las técnicas de recombinación de ADN podrían aplicarse pronto para cambiar la actividad de la microflora del tracto gastrointestinal del cerdo, con el fin de que sintetice celulasa, el enzima que degrada la celulosa, constituyente mayoritario de los vegetales, y la desdobla en glucosa, su monómero. Tal desarrollo cambiaría radicalmente las restricciones que la incapacidad del cerdo para digerir la celulosa imponen hoy a su alimentación. Podrían entonces añadirse a su dieta alimentos que hoy el cerdo no puede comer o digerir completamente.

Otra importante aplicación de las técnicas de recombinación de ADN podría suministrar aminoácidos, los monómeros de las proteínas, a la producción industrial ganadera. Algunas ce-



pas de bacterias recombinantes con gran capacidad de síntesis de aminoácidos pueden ya cultivarse a escala piloto. Si los aminoácidos así producidos resultaran a un precio competitivo con los piensos en uso, podrían ahorrarse al año más de 1.800.000 toneladas de proteínas. Las necesidades metabólicas del animal podrían satisfacerse con piensos pobres en proteínas combinados con mezclas equilibradas de aminoácidos.

En la producción porcina desempeñarán también un importante papel nuevos tipos de alimentos. Los mejoradores de plantas están ensayando nuevas variedades de maíz, cebada y avena con alto contenido en lisina, aminoácido esencial para la nutrición animal que es deficiente en las variedades más antiguas. Los animales alimentados con esas variedades ricas en lisina necesitan menos suplemento proteico. En los países en vías de desarrollo los cerdos se alimentan con productos que tradicionalmente no se incluían en la dieta porcina. Así, en Nueva Guinea, se les da batata y harina de pescado y, en Ecuador, bananas. Finalmente, varias fuentes de proteína microbiana, como bacterias desecadas, levaduras y algas, ofrecen un suministro potencial de alimentos para el porcino.

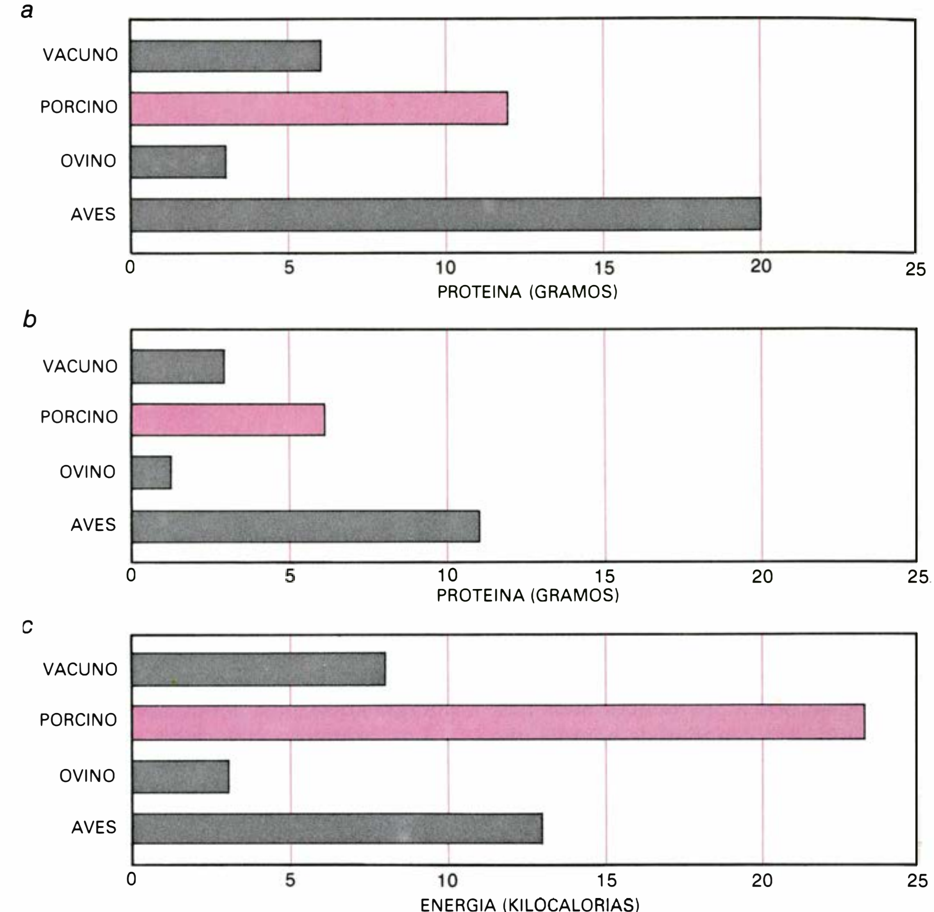
El interés en mejorar la reproducción procede de la alta tasa de mortalidad perinatal. En los Estados Unidos, la mortalidad prenatal es, normalmente, del 20 al 40 por ciento. Una cerda libera cerca de 17 óvulos en cada celo. Aunque se fecundan casi el 95 por ciento de los óvulos, sólo nacen, por término medio, 9,4, de los que 7,2 sobreviven hasta el mercado. En la propia Dinamarca, que se destaca por el gran énfasis puesto en la eficacia de la producción porcina, el 20 por ciento de los cerdos de una lechigada mueren antes del destete, que se realiza a las seis u ocho semanas de edad.

La investigación sobre los factores genéticos, endocrinos y nutritivos asociados con la elevada mortalidad prenatal señala la posibilidad de inducir una superovulación mediante el adecuado tratamiento hormonal. Desde hace ya algún tiempo puede sincronizarse la

6. DISPOSICION DE COMEDEROS automáticos para cerdos diseñada para una unidad de reclusión total. El alimento que procede del silo es maíz o granos de cereal, traídos desde el depósito de almacén hasta la mezcladora por un tornillo eléctrico. Los suplementos de proteína, vitaminas y minerales se añaden a razón de casi un kilogramo por cada cuatro u ocho kilogramos de grano. La mezcla se desplaza hasta los comederos por tornillos o por cintas transportadoras. El suelo emparrillado facilita la limpieza. El comedero que aparece en la portada es una unidad de este sistema.

ovulación de hembras mediante hormonas; práctica que todavía no ha merecido el respaldo general de la industria porcina ante la imposibilidad actual de congelar el semen de verraco. La sincronización de la ovulación, superovulación, junto con la inseminación artificial con semen fresco o congelado de verracos genéticamente mejor dotados, pueden permitir el logro de mayores tasas de supervivencia en cada gestación.

Una mejora en la eficacia reproductora debe ir acompañada de una mejora en los cuidados de los lechones en los días siguientes al parto. Los calostros, la leche que segrega la madre en los días que siguen al parto, contienen anticuerpos contra gérmenes patógenos que pueden infectar a los lechones. Se sabe ya que si los lechones han mamado los calostros durante dos o tres días pueden luego alimentarse sin problemas con dietas líquidas o sólidas, y quizá mejor con dietas sólidas, ya que se presentan menos problemas de diarreas. Combinando las técnicas que aumentarían la media de cerdos viables por lechigada a 15 o 20, con el destete precoz de parte de la lechigada a los dos o tres días, se obtendría un incremento significativo en el número de cerdos acabados por año y cerda de cría, desde los 12 o 14 actuales hasta una media de 24 o más.



7. RENDIMIENTO EN LA CONVERSION de cuatro especies animales de consumo. Se muestra la cantidad de proteína comestible por cada 100 gramos de proteína consumidos (*a*); la cantidad de proteína digerible por cada 100 kilocalorías de energía metabolizable que come el animal (*b*) y las kilocalorías de energía comestible por 100 kilocalorías de energía metabolizable contenida en el alimento (*c*).

Objetivos inmediatos

Los previsibles avances de la cría porcina anuncian que es posible alcanzar ciertos objetivos en los próximos 20 o 30 años. En diversos estudios realizados en distintas universidades y por colegas míos, del Centro de Investigación sobre carne del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, se consideran ocho factores de importancia económica en la producción porcina. El número de lechigadas por cerda y año debe subir de 1,8 a 2,2 y el número de cerdos vendidos por cada cerda y año de 13 a 24. Deben reducirse las elevadas pérdidas que se dan hoy; expresadas en porcentaje de cerdos perdidos entre el parto y el destete, el cambio sería del actual 15 a 30 al 5 o 10 por ciento y, expresadas en número de cerdos criados por lechigada, éste debería aumentar de 7,2 a 11. El número de kilogramos de pienso por kilogramo de ganancia de peso es ahora de 3,5 y puede esperarse que sea de 2,5 o menos; el tiempo entre nacimiento y sacrificio debería rebajarse de los cinco o seis meses actuales a cuatro o cinco. Dado que el magro es cada vez más deseado por el consumidor, cabe esperar que el porcentaje de grasa en la canal se reduzca del 41 al 32 por ciento, o menos, y que el espesor medio de la grasa dorsal al peso de sacrificio pase de 40 milímetros a la mitad.

En 1978, Henry A. Fitzhugh y algunos de sus colegas sondearon las proporciones de energía alimentaria y proteína que los humanos demandarían del porcino, de los rumiantes y de las aves en el año 2000. De 1970 al 2000 previeron un incremento del 23 por ciento en el número de cerdos; del 23 por ciento para las aves (pollos, patos y pavos) y del 29 para rumiantes (vacuno, ovino y caprino). Además, predijeron que la energía alimentaria procedente del porcino sería de 215.000 millones de megacalorías en el año 2000, en vez de los 144.000 millones de 1970, y que la proteína porcina sería de tres millones de toneladas, comparados con los dos millones de 1970. La carne de cerdo suministrará el 23 por ciento de la energía y el 8 por ciento de la proteína procedente de animales, comparada con el 25 y el 9, respectivamente, de 1970. En otras palabras, aunque se predice un aumento muy considerable de la producción porcina, su contribución global a la alimentación humana se reducirá ligeramente.

Otros papeles del porcino

Además de su importancia en ganadería, el cerdo es un modelo muy rentable en muchos estudios sobre fisiología y nutrición relativos a la salud humana. Los Suídos son similares a los humanos en la anatomía y fisiología de varios órganos y sistemas orgánicos, como dientes, ojos, riñones, sistema cardiovascular, piel y sistema digestivo. Los estudios sobre el cerdo han ayudado a dilucidar múltiples trastornos humanos.

En medicina clínica, las válvulas del corazón del cerdo se han injertado a menudo en sustitución de las del corazón humano dañadas. Son de amplio uso en medicina varias sustancias vitales obtenidas de tejidos del cerdo, por ejemplo, insulina, del páncreas, y heparina (anticuagulante), de los pulmones. Además, su piel puede injertarse con éxito en el cuerpo humano para reparar quemaduras.

Nuevos materiales inorgánicos

Los materiales orgánicos desempeñan un papel destacado en la civilización moderna. Pero hay otros, fabricados con arena, arcilla y otros minerales, que aventajan a los primeros en algo importante: necesitan menos energía

J. D. Birchall y Anthony Kelly

Echemos un vistazo a nuestro alrededor. ¿Qué vemos? Objetos fabricados a partir de múltiples materiales: metales, plásticos, cerámica, vidrio y hormigón. Son los productos de una sociedad tecnológica que consume energía para fabricarlos. La producción mundial de materiales para la construcción y manufacturados gasta, al año, una cantidad de energía que equivale a 10^9 toneladas de petróleo. Cifra que representa el 15 por ciento del gasto mundial total de energía y, a su vez, equivale al consumo mundial de gas natural.

La cantidad de energía necesaria para fabricar un material varía mucho según la naturaleza de éste. Conviene tomar de referencia el cemento portland, porque se fabrica a partir de dos constituyentes muy abundantes en la corteza terrestre: caliza y arcilla. Además, el cemento portland se produce en grandes cantidades: casi 10^9 toneladas anuales en todo el mundo. La fabricación de un metro cúbico de cemento portland requiere unos 3×10^{10} joule de energía; para producir un metro cúbico de poliestireno hace falta, en cambio, una energía seis veces superior y, si de un metro cúbico de acero inoxidable se trata, multiplicaremos por 29 la energía consumida por el portland.

Lisa y llanamente, el cemento portland típico, un material inorgánico, ofrece una destacada ventaja, desde el punto de vista energético, sobre los plásticos, que se fabrican a partir de materias orgánicas, y sobre los metales, cuyo proceso de fusión requiere temperaturas muy elevadas. Si a ese ahorro añadimos la variedad y disponibilidad de los productos químicos de la Tierra (óxidos de silicio y de aluminio, carbonatos de calcio y de magnesio, etcétera), quizá valiera la pena replantearse la tecnología de los materiales inorgánicos, sobre todo la de los que consumen gran cantidad de energía en su fabricación; en los tiempos que corren la energía es cara y en el horizonte comienza a asomar el fin de una fácil disponibilidad de hidrocarburos en forma de petróleo. La investigación que describiremos en este artículo demostrará que los materiales inorgánicos pueden sustituir perfectamente en múltiples aplicaciones a los materiales que consumen mucha energía en su proceso de fabricación.

Los primeros materiales empleados por el hombre fueron el sílex (variedad del cuarzo) y otros minerales, junto con otros de origen animal o vegetal: piel, hueso y madera. Estos permitieron al hombre primitivo mejorar la caza y la recolección de alimentos. El sílex es duro, frágil y amorfo en su estructura microscópica; de ahí que presente fractura concoidal y pueda ser tallado en forma de filo cortante. En la Edad de Piedra se usó el sílex en tan gran escala que fue necesario excavar galerías para su extracción.

El siguiente material fue el bronce, que se obtuvo por la yuxtaposición casual de rocas fáciles de fundir (menas de cobre y zinc) con carbón como fuente de calor. Simultáneamente se descubrió que la arcilla húmeda podía endurecerse por cocción y que previamente podía ser moldeada para darle forma útil. Algo más tarde se logró la reducción del mineral de hierro a hierro metálico. Así pues, las tecnologías con materiales sintéticos más antiguas fueron la metalurgia y la cerámica.

Un avance muy posterior fue el descubrimiento, por los romanos, de que una mezcla de ceniza volcánica y cal reaccionaba con el agua para formar una masa sólida y dura: el cemento. Esta fue la primera tecnología inorgánica a baja temperatura. En la reacción, la sílice (SiO_2) de la ceniza se combina con la cal apagada ($Ca(OH)_2$) para formar un silicato de calcio que no posee una composición química fija. En 1824 Joseph Aspdin mejoró la tecnología calentando la cal con un material como la arcilla, que contiene sílice. Después de enfriado se obtienen grumos de cemento portland ("clinkers") que contienen los silicatos $2\,CaO{\cdot}SiO_2$ y $3\,CaO{\cdot}SiO_2$. Cuando el "clinker" se mezcla con agua fragua un sólido que se vuelve duro y firme como una roca. En lugar de dar forma a una roca por escarpado o corte, podemos ya moldear el hormigón (cemento mezclado con arena y grava).

Los metales, la cerámica, la piedra y el cemento continuaron dominando la tecnología hasta los primeros años de nuestro siglo. El cemento, sin embargo, tan sólo se utilizó en aplicaciones limitadas. Más tarde, llegó la edad de los plásticos cuyo comienzo puede datarse en 1907, cuando Leo H. Baekeland obtuvo la primera resina sintética: la baquelita. Con anterioridad ya se habían modificado algunos polímeros naturales, consiguiéndose materiales con propiedades nuevas y útiles. El caucho natural, por ejemplo, se alarga por tracción. En 1839 Charles Goodyear estableció que se endurecía por adición de azufre. Los átomos de azufre forman puentes entre las cadenas hidrocarbonadas de que se compone el caucho. La nitrocelulosa, desarrollada por Christian Friedrich Schonbein en 1845, es frágil. En 1864 Alexander Parke descubrió que la adición de alcanfor, una sustancia viscosa que se obtiene del árbol del alcanfor, la hace plegable. Las moléculas de alcanfor actúan como un lubricante entre las cadenas hidrocarbonadas. La nitrocelulosa plastificada sirvió para fabricar la primera película cinematográfica.

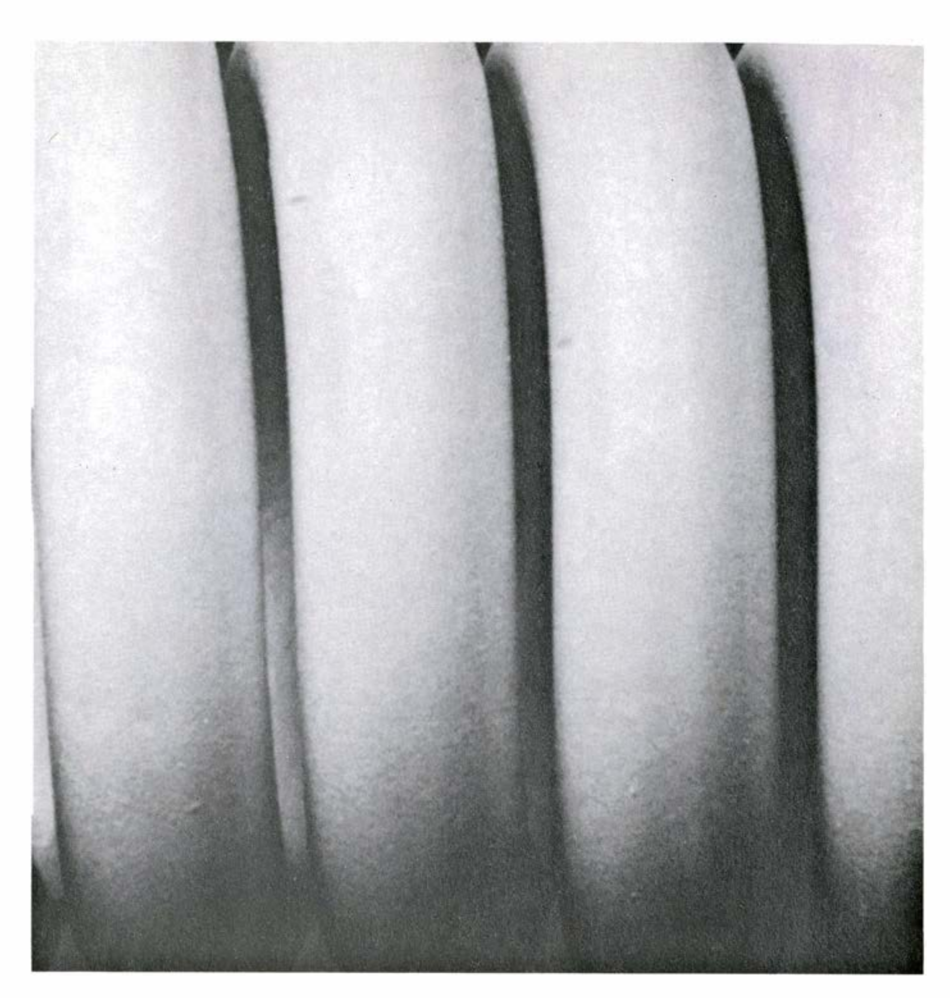
Con la irrupción de la baquelita comenzó realmente la edad de los plásticos. El caucho sintético apareció en 1910, el poliestireno en 1925 y el nilón, el polietileno y los poliésteres en los años treinta. La primera industria de polímeros sintéticos se estableció en 1940. En ese año el carbón representó el 95 por ciento de la materia prima para la obtención de productos orgánicos

sintéticos. Hoy en día, cuatro décadas después, la producción de materiales orgánicos sintéticos se ha incrementado cien veces y el petróleo representa el 97 por ciento de la materia prima. Aunque el precio del petróleo acaba de bajar algo, a lo largo de los últimos ocho años su valor se multiplicó por quince.

¿Qué futuro espera a la tecnología de materiales? Se sigue confiando, por un lado, en la obtención de polímeros sintéticos a partir del carbón. A buen seguro sucederá. Pero se habla también de que la materia prima procederá de los productos químicos de la Tierra. Además de su disponibilidad, los sólidos inorgánicos son intrínsecamente más rígidos que los polímeros orgánicos. Y preocupan cada día más los riesgos de incendio de los materiales orgánicos en viviendas y edificios públicos. Los materiales inorgánicos no arden.

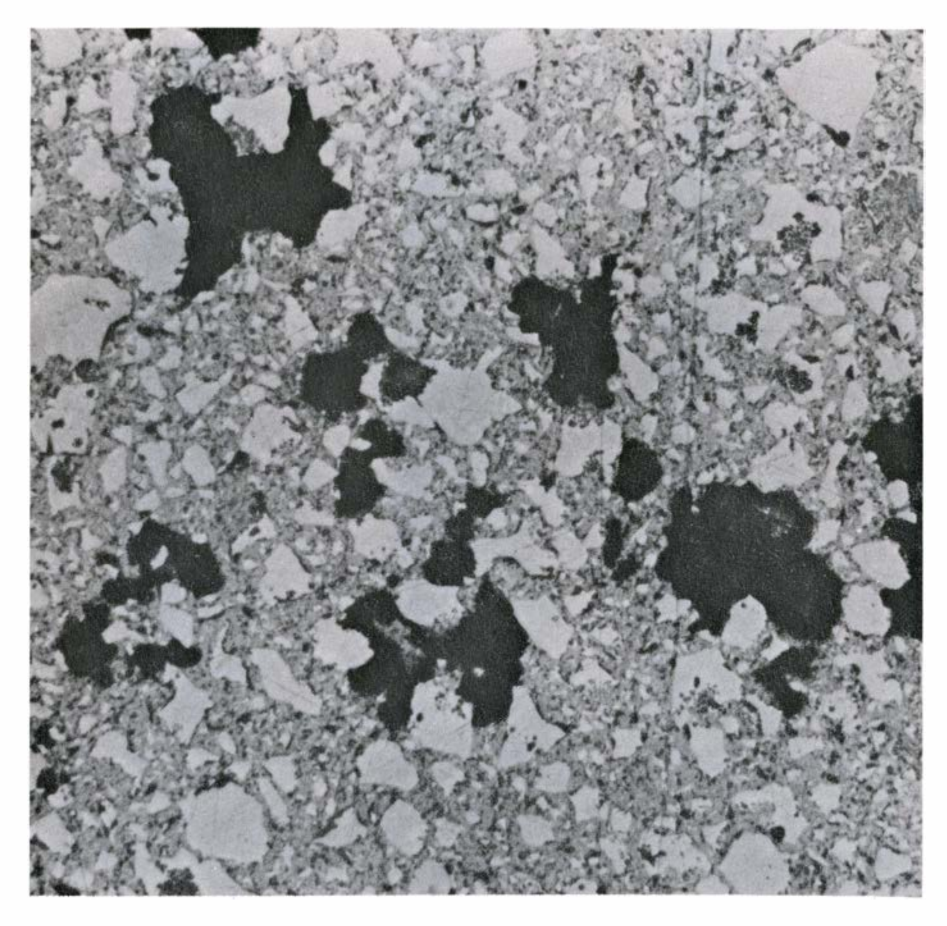
En la década de los años sesenta se esperaba sintetizar gran variedad de polímeros inorgánicos que hallarían aplicación comercial. Se pensaba que los polímeros inorgánicos, análogamente a los polímeros orgánicos, consistirían en largas cadenas de monómeros repetidos y cuyo esqueleto estaría formado por átomos distintos del carbono. Hasta la fecha, el único polímero inorgánico sintético que ha aparecido es la silicona. Tiene la silicona un esqueleto de átomos de silicio y átomos de oxígeno dispuestos alternadamente. Así pues, los polímeros inorgánicos sintéticos constituyeron largo tiempo un sueño; pero ocurre, por otro lado, que los naturales sí son muy utilizados. Pensemos en el vidrio. Además, las rocas silicatadas de la corteza terrestre consisten en cadenas y anillos de átomos de silicio y de oxígeno dispuestos de un modo alternado. El problema estriba en que la producción de materiales como el vidrio, según suele llevarse a cabo, exige una elevada temperatura y esto frustra el objetivo de volver a los materiales inorgánicos para así ahorrar.

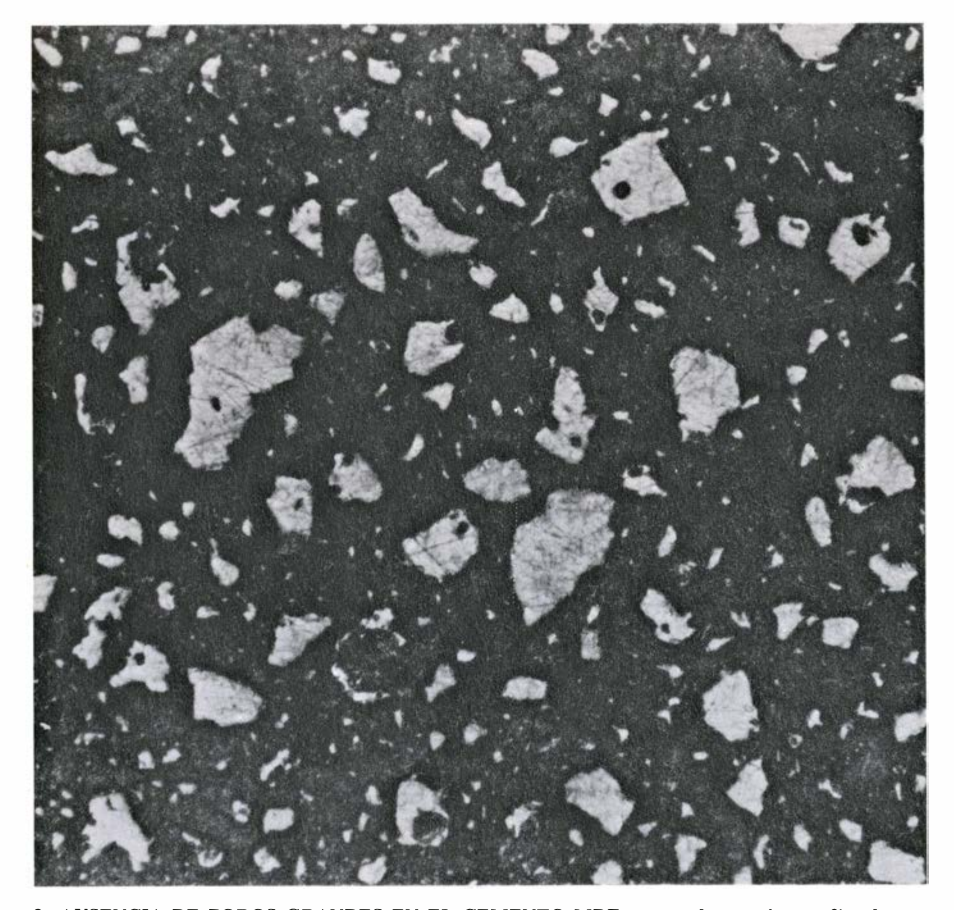
Existe un segundo problema. Este se refiere a las propiedades básicas de los materiales que determinan su posible aplicación. Tres de tales propiedades son las siguientes: la rigidez (resistencia a la flexión), la resistencia a la tracción





1. RESORTE FABRICADO CON CEMENTO sometido a una tensión de 1300 newton (*arriba*) y sin tensión (*abajo*). Se ha preparado un cemento especial sin poros ni grietas superiores a unos pocos micrometros. De ahí le viene el nombre de cemento libre de macrodefectos, que se abrevia en cemento MDF, muy resistente a la rotura. De hecho presenta una resistencia equiparable a la del aluminio.





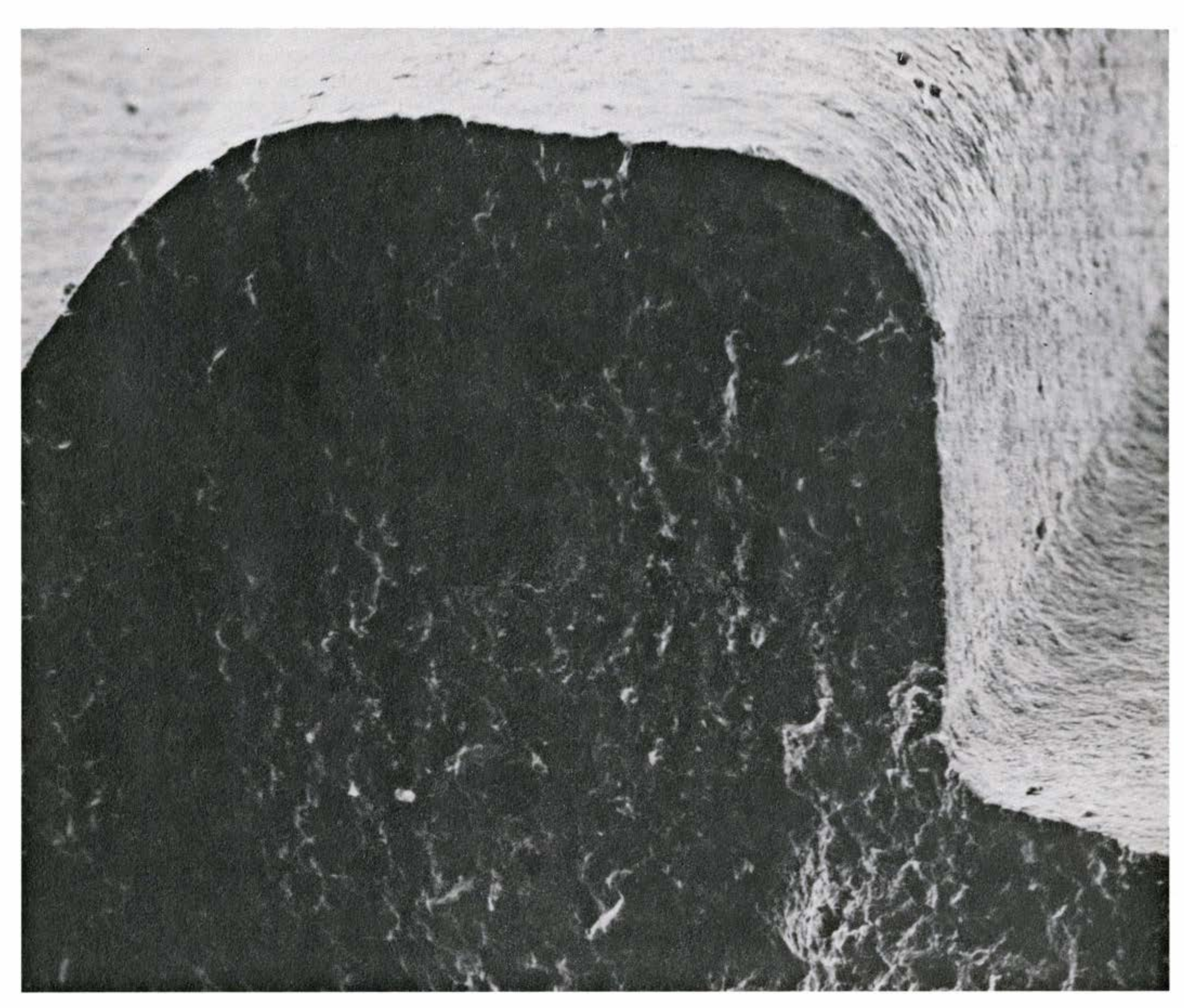
2. AUSENCIA DE POROS GRANDES EN EL CEMENTO MDF, mostrada en micrografías de una sección pulida de cemento corriente (*arriba*) y cemento libre de macrodefectos (*abajo*). Los poros del cemento corriente (*áreas negras*) representan, como máximo, el 30 por ciento del volumen del material; son los responsables de su baja resistencia. Ambas micrografías presentan 50 diámetros de aumento.

(resistencia al estirado) y la tenacidad (resistencia al impacto). Propiedades todas ellas a tener en cuenta a la hora de decidir su aplicación. Los polímeros orgánicos y los materiales orgánicos, la madera entre éstos, no son tan rígidos como los materiales inorgánicos, verbigracia la cerámica y el vidrio; por cuya razón muchos materiales orgánicos se refuerzan incorporando en su interior fibras de material inorgánico. Sin embargo, los materiales inorgánicos carecen de tenacidad. Si aumentara la tenacidad de los materiales inorgánicos, habría alguna posibilidad de que reemplazaran a los plásticos y a los metales.

¿Tienen solución estos dos problemas? Vale decir: ¿podemos fabricar, a baja temperatura, materiales inorgánicos suficientemente tenaces? El estudio de los organismos vivos sugiere que sí. Los organismos vivos aprovechan el carbonato de calcio, el fosfato de calcio y la sílice con un control exacto y por medios refinados. La concha de la oreja de mar, por ejemplo, contiene un 99 por ciento de carbonato de calcio; es casi caliza pura. Su resistencia a la tracción supera los 100 megapascal (100 millones de newton por metro cuadrado) y su tenacidad es superior a los 100 joule por metro cuadrado de nueva superficie generada por fractura, cuya magnitud es equiparable a la del poliestireno y del plexiglás.

Un examen de la estructura microscópica de la concha mediante el microscopio electrónico muestra cómo se consiguen estas propiedades. Láminas de carbonato de calcio de 0,2 micrometros de espesor están separadas unas de otras por una delgada capa de proteína. En caso de producirse una grieta en la concha, se verá obligada a atravesar un camino tortuoso; de ahí la gran tenacidad del caparazón. No se conoce todavía cómo la proteína actúa de patrón para la deposición de un motivo ordenado de material inorgánico a la temperatura ambiente. Igual ocurre con el crecimiento óseo.

Detengámonos en la obtención de un material inorgánico: la porcelana. Su comparación con la formación de la concha de la oreja de mar puede resultar instructiva. El proceso básico de la fabricación de la porcelana fue descubierto en China y se difundió por Occidente en los primeros años del siglo XVIII por el padre F. X. d'Entrecolles, en lo que fue seguramente el primer caso de espionaje industrial. D'Entrecolles residió cierto tiempo en Kingtehchen, un centro de fabricación de porcelana en la provincia de Kiangsi, y



3. TAPON DE BOTELLA HECHO DE CEMENTO, un ejemplo en que el cemento MDF sustituye al plástico. La micrografía obtenida mediante microscopía electrónica de barrido, a 75 diámetros de aumento, pone de relieve una fractura (*área oscura*) de la sección transversal del tapón de la botella.

aprendió el chino con objeto de determinar el papel que desempeñaba la clase de arcilla de China llamada caolín en la fabricación de la porcelana (hoy en día caolín es una de las pocas palabras chinas que hay en la lengua castellana).

La cerámica de la alta calidad de la porcelana se fabrica por cocción, esto es, calentando una mezcla de cuarzo, feldespato y arcillas (normalmente caolín y arcilla de alfarero, una arcilla de grano fino que contiene algo de materia orgánica) a una temperatura elevada. Se comienza pulverizando las materias primas y mezclándolas con agua. Las pastas resultantes se prensan en una tela para eliminar el exceso de agua; luego se mezclan las pastas y se hacen pasar a través de un extrusor helicoidal bajo vacío, al objeto de eliminar la mayor parte del aire. La mezcla se seca y se le da forma, tal como lo haría un alfarero, y el objeto resultante se coloca en el interior de un molde de yeso para eliminar el agua restante. A continuación se recubre el objeto con un vidriado. El vidriado suele consistir en arcilla combinada con un fundente adicional: material que funde fácilmente.

Después de otro secado, el objeto se cuece. A temperaturas próximas a los 400 grados Celsius se inician una serie de reacciones químicas. A unos 600 grados Celsius el material se vuelve vítreo y se forman cristales, y así el material se contrae. Esta temperatura es aproximadamente un tercio de la temperatura de fusión del material. Se trabaja a esta temperatura de un modo deliberado: la fusión del material daría lugar a cristales grandes e irregulares, en vez de los deseados cristales pequeños y regulares, y, además, se requeriría un elevado y costoso gasto de energía. De este modo, los átomos se difunden lentamente en el material no fundido, de modo que cuando el agua se evapora aparecen poros. Además, los distintos cristales del material son de composición variada y presentan, por tanto, propiedades mecánicas diferentes. Se distinguen, sobre todo, en su coeficiente de dilatación térmica, o grado de dilatación para un calentamiento dado, y de contracción para un enfriamiento determinado. Cuando la cerámica se enfría, algunos de los poros y huecos se pueden rellenar, pero se desarrollan grietas y otros defectos. La cerámica a temperatura ambiente es frágil y débil.

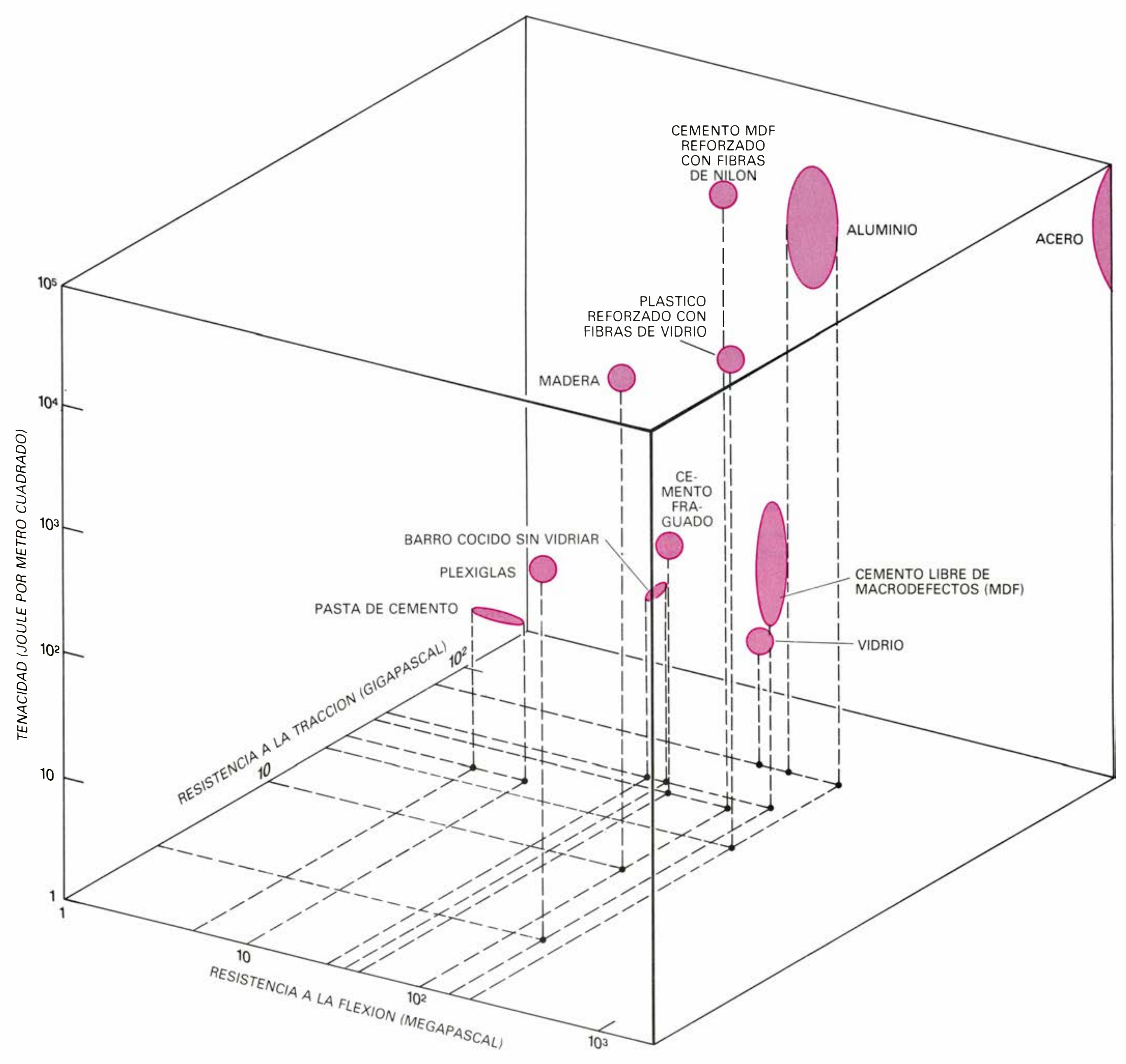
Es por esto por lo que todos los artículos cerámicos útiles se recubren con un vidriado, que posee un coeficiente de dilatación menor que el de la cerámica. Por este motivo, el enfriamiento que sigue a la cocción de la cerámica provoca la compresión del vidriado. Este confiere a la cerámica una protección que dificulta la generación de grie-

tas en la superficie y, por tanto, su posible rotura.

Sin embargo, la cocción a temperatura elevada, que pretende comunicar resistencia a la cerámica, permitiendo la difusión y contracción del material, introduce grietas en las paredes. La temperatura elevada no es el único procedimiento para conseguir la difusión de los átomos para llenar los resquicios. Otro procedimiento consiste en utilizar el agua como disolvente y difusor de los iones. Esto es lo que sucede en los cementos hidráulicos: sólidos que fraguan en presencia de agua. El yeso y el portland son dos ejemplos.

Cuando los silicatos de calcio del cemento portland se mezclan con agua, parte de ésta participa en la formación de silicatos de calcio hidratados. Hoy en día, 150 años después de la invención del cemento portland, todavía no están bien establecidas las reacciones. El resto del agua se pierde por evaporación, dando lugar a poros en el cemento, poros cuyo diámetro varía desde unas pocas decenas de angstrom hasta más de un milímetro; en total pueden ocupar del 25 al 30 por ciento del volumen del sólido.

Desde hace muchos años se sabe que la resistencia de un cemento, como la resistencia de una cerámica cocida, depende de su porosidad. Se desconoce la relación exacta de dicha dependencia. Se halló, en un comienzo, que la resistencia de un cemento fraguado dependía de la relación agua-sólido empleada. La resistencia aumenta conforme se reduce la proporción de agua. Más tarde, se propuso que la resistencia podía depender del volumen de los poros que quedaban en el cemento fraguado. La resistencia aumenta conforme disminuye la porosidad. La resistencia de un cemento típico suele ser bastante baja: su resistencia a la flexión no llega a los 5 megapascal y su resistencia a la tracción es tan sólo 7 veces mayor. Es por esto por lo que el cemento y el hormi-



4. TRES PROPIEDADES de un material: rigidez (resistencia a la flexión), resistencia a la tracción (resistencia al estirado) y tenacidad (resistencia al impacto). Estas propiedades se han representado aquí para varios materiales orgánicos e inorgánicos. Las escalas son logarítmicas. Los materiales orgánicos, así la madera, poseen tenacidad elevada pero una rigidez baja. Los materiales inorgánicos, el vidrio, constituyen la otra cara de esa moneda. El cemento MDF posee las tres propiedades anotadas en casi tan alto grado como el aluminio. La rigidez y la resistencia a la tracción están en pascal; un megapascal equivale a un millón de newton por metro cuadrado. La tenacidad es la energía necesaria para abrir fracturas que sumen un metro cuadrado.

gón se emplean en la construcción únicamente para soportar cargas compresivas (esfuerzos de compresión) y por lo que se refuerzan con acero con la finalidad de soportar esfuerzos de tracción.

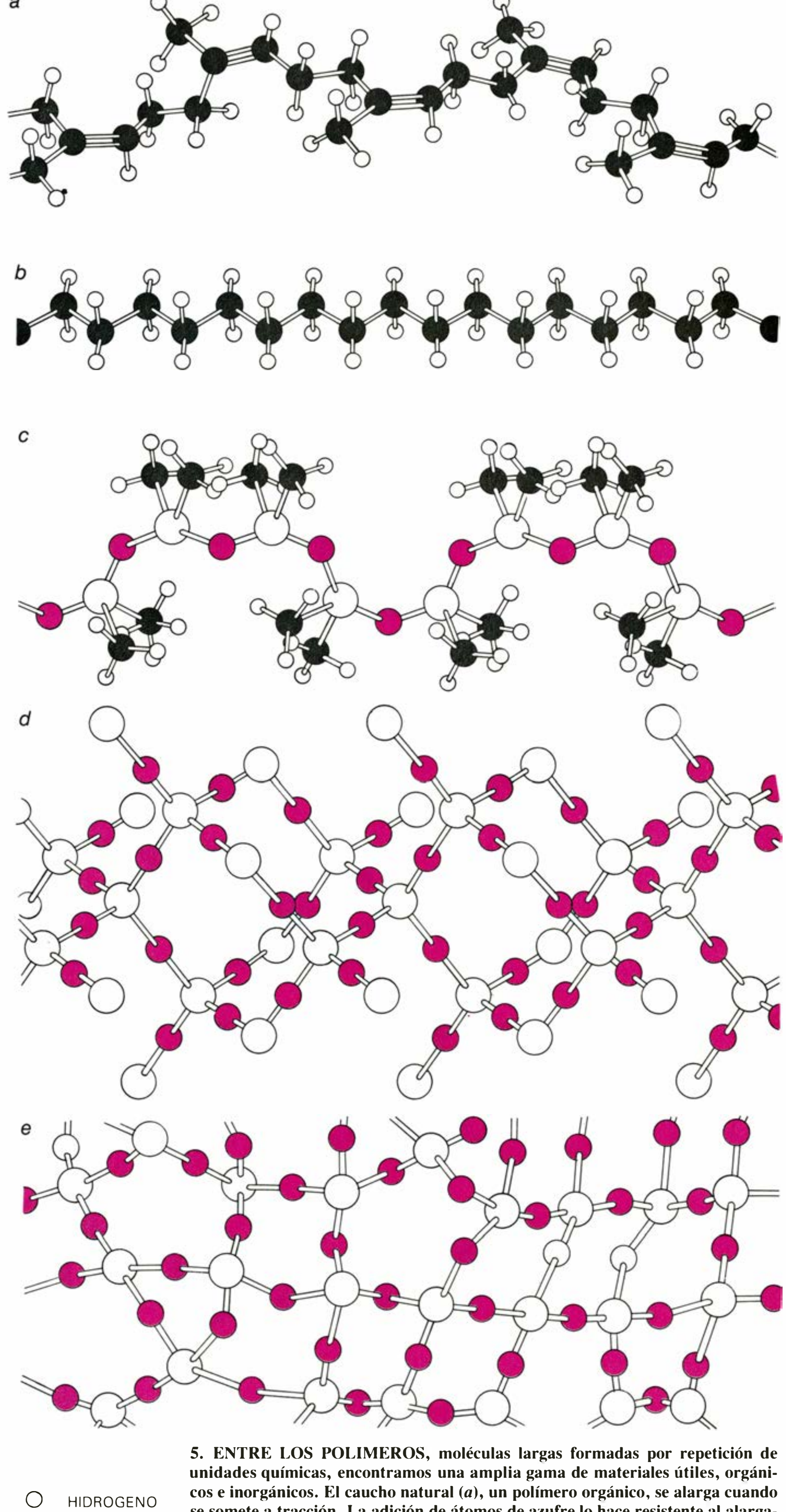
Supongamos que se extrapola la relación entre la porosidad y la resistencia para predecir la resistencia de un cemento sin poros. El resultado es una resistencia a la flexión de aproximadamente 20 megapascal. La resistencia a la flexión de las aleaciones de aluminio es unas 5 veces superior, y la resistencia a la flexión del acero es 50 o 100 veces superior. Aun cuando el cemento se refuerce con asbesto o fibras de vidrio, se puede predecir una resistencia a la flexión no superior a los 40 megapascal.

Sin embargo, la extrapolación a porosidad cero no resulta ya válida. La teoría más simple para explicar la fractura de un sólido frágil la desarrolló en 1920 Alan A. Griffith, en el Royal Aircraft Establishment de Farnborough (Inglaterra). Propuso que la resistencia a la tracción de un sólido frágil se determinaba por el tamaño de la grieta más larga en el material. Si la teoría fuera correcta, la resistencia de un cemento debería aumentar drásticamente conforme disminuyera el diámetro de sus poros más largos. De otro modo, la resistencia de un cemento sólo dependería, aunque ligeramente, del número de poros o de su volumen.

Y eso es lo que ocurre. Anthony James Howard, Kevin Kendall y uno de nosotros (Birchall), trabajando en los laboratorios de investigación del Imperial Chemical Industries (ICI) en Runcorn (Inglaterra), hemos demostrado recientemente que el cemento obedece a la teoría de Griffith. Además, hemos desarrollado técnicas mediante las que puede reducirse el diámetro máximo de los poros del cemento desde un milímetro hasta un valor que no excede unos pocos micrómetros. En esencia, se reduce el tamaño de los poros. Con la finalidad de aumentar su fluidez, se clasifica el cemento según su granulometría y se le añade una pequeña proporción de polímero, lo cual facilita el amasado.

El nuevo material se conoce como cemento libre de macrodefectos (MDF). Sometido al ensayo de flexión muestra una resistencia superior a los 150 megapascal, comparable a la del aluminio. Ciertamente, es posible utilizaı cemento para fabricar un muelle.

El cemento MDF presenta también una tenacidad notable. La mayoría de los materiales inorgánicos obtenidos artificialmente tienen una tenacidad in-

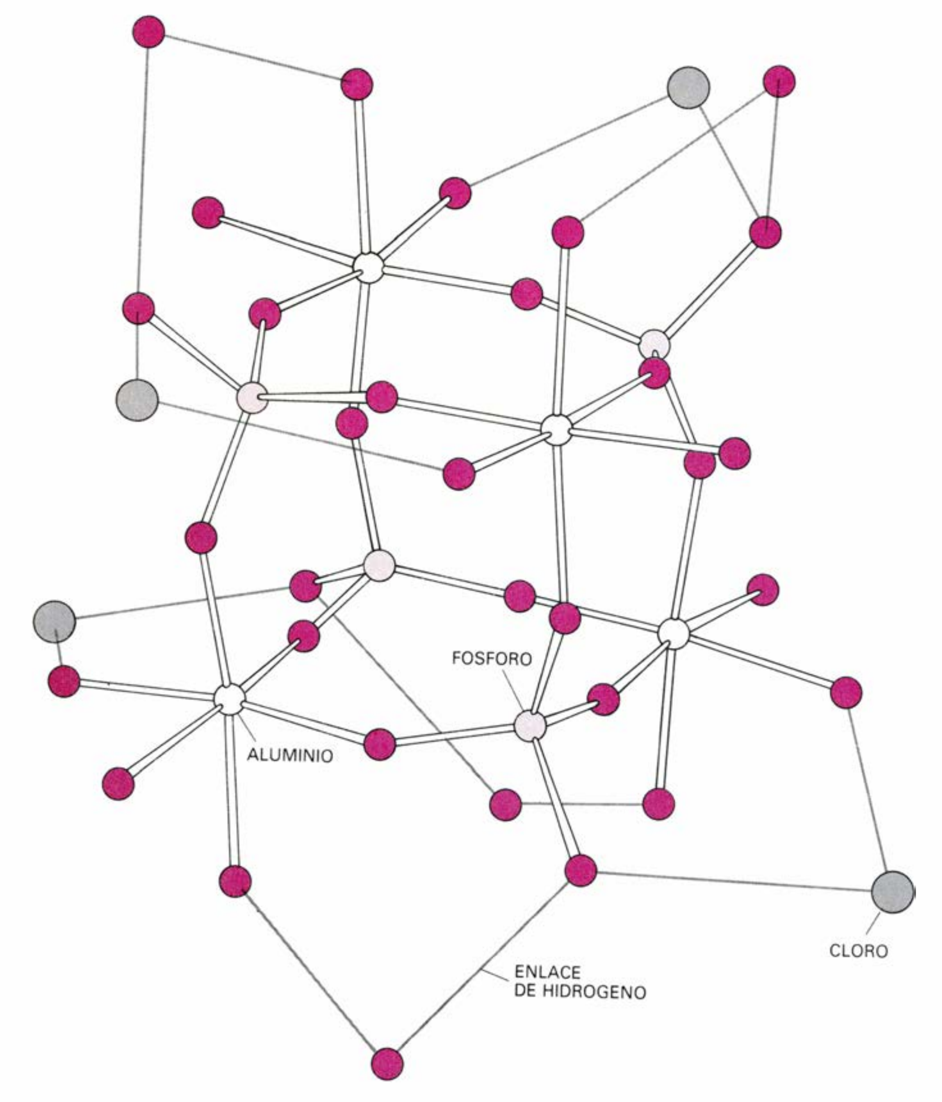


5. ENTRE LOS POLIMEROS, moléculas largas formadas por repetición de unidades químicas, encontramos una amplia gama de materiales útiles, orgánicos e inorgánicos. El caucho natural (*a*), un polímero orgánico, se alarga cuando se somete a tracción. La adición de átomos de azufre lo hace resistente al alargamiento por formación de puentes entre sus cadenas hidrocarbonadas. El polietileno (*b*) es un polímero orgánico sintético, que fue introducido en los años treinta y contribuyó al crecimiento de la industria del plástico. La silicona (*c*) es sintética e inorgánica; su esqueleto lo forman átomos de silicio y oxígeno alternados. Este compuesto representa la única síntesis con éxito comercial de un polímero inorgánico, aunque tales polímeros son frecuentes en la naturaleza. El mineral cristobalita (*d*) es un polímero de silicio y oxígeno, tal como un vidrio silicatado (*e*).

ferior a los 10^2 joule por metro cuadrado. En contraste, la tenacidad de la madera es 10^4 joule por metro cuadrado en la dirección perpendicular a la fibra. (Desciende a 10^2 joule por metro cuadrado en la dirección paralela a la fibra.) El mineral jade presenta una tenacidad de 10^3 joule por metro cuadrado, lo que posibilita que se le dé forma por tallado. La tenacidad del cemento MDF es aproximadamente de 10^3; por tanto, a un bloque de cemento se le puede dar forma de tubo mediante un torno convencional, notable propiedad para un material inorgánico.

No existe ningún cemento muy resistente al impacto, a menos que se le refuerce con fibras. La tecnología relativa a este punto ha entrado ya en fase de madurez. Y, así, tiras de cemento ordinario pueden doblarse como si se tratara de tiras de metal. La flexión agrieta el cemento, pero las hendiduras son bastante estrechas y las fibras de refuerzo mantienen al cemento unido. Desde que el cemento se fabrica a baja temperatura, las fibras pueden ser orgánicas, baratas y con una temperatura de fusión baja.

El nuevo cemento de elevada resistencia tiene el aspecto de una cerámica; a buen seguro, se podrían fabricar con él buenas copas y platos. Además, presenta muchas de las propiedades de la cerámica: es fuerte, duro, frágil y rígido, y está formado principalmente por enlaces covalentes. No es, sin embargo, un material refractario: material que conserva sus propiedades a temperaturas elevadas. El motivo es que contiene agua en combinación química con sus silicatos de calcio. A temperatura elevada, el agua se elimina, produciéndose un sólido mucho más débil. Obviamente, sería muy interesante diseñar procedimientos de fabricación a baja temperatura de materiales refractarios.



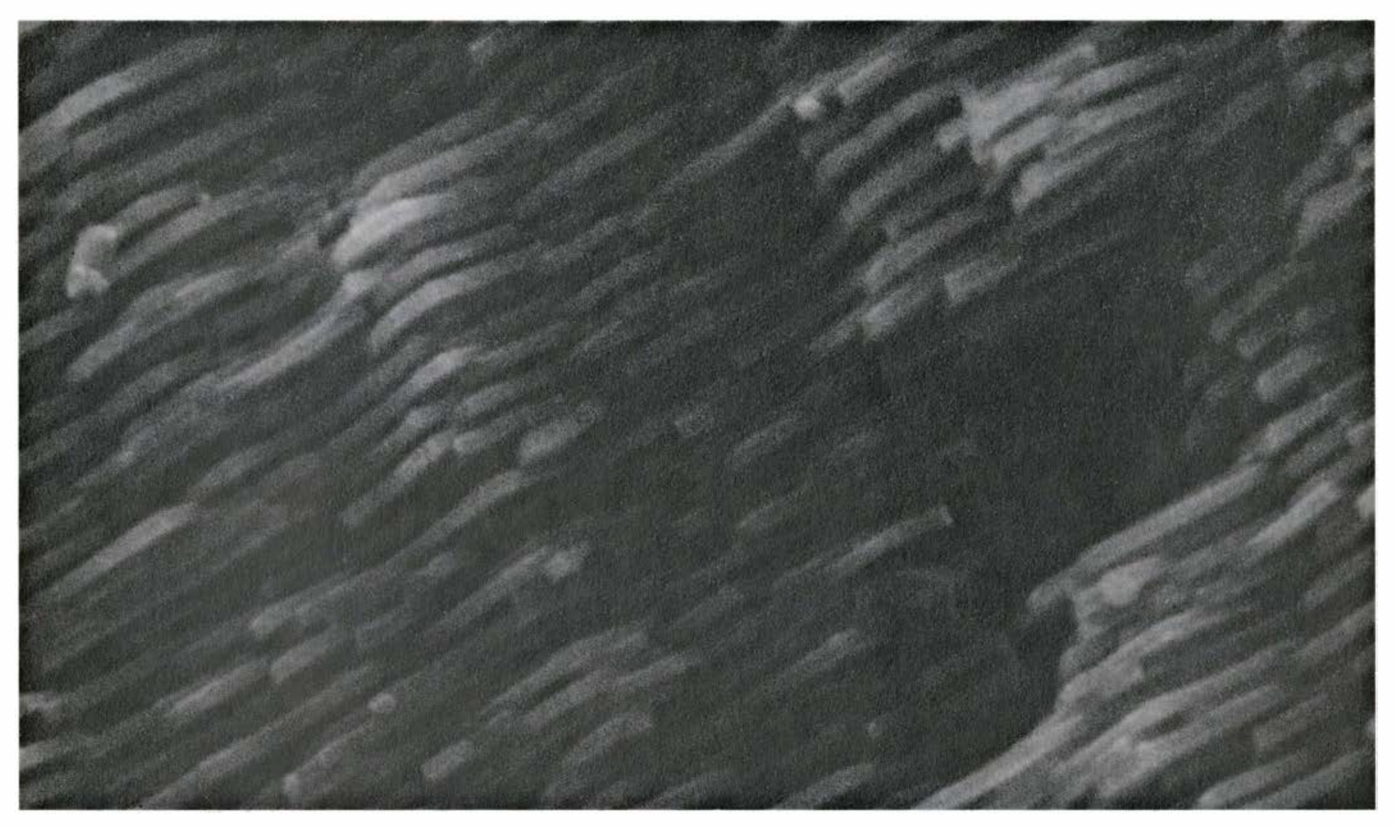
6. FOSFATO DE ALUMINIO VITREO ($AlPO_4$) obtenido por reacción del tricloruro de aluminio ($AlCl_3$) con el ácido fosfórico (H_3PO_4) en etanol (C_2H_5OH). La reacción rinde directamente el material intermedio que se muestra en la figura. Los átomos de aluminio y los de fósforo aproximadamente se sitúan en los vértices de un cubo; los átomos de oxígeno se colocan a lo largo de sus aristas. Los cubos están separados entre sí por moléculas de etanol. A temperaturas próximas a los 100 grados Celsius el alcohol se elimina y los cubos coalescen formando un vidrio. La estructura del material intermedio fue determinada por John E. Cassidy y sus colegas, adscritos a la empresa Imperial Chemical Industries.

Existen dos soluciones verdaderamente prometedoras. Dijimos antes que las rocas silicatadas y los minerales de la corteza terrestre son polímeros en los que átomos de oxígeno y átomos de silicio alternados forman cadenas y anillos. En algunos de estos minerales las cadenas y anillos se unen para constituir láminas de silicatos de algunas décimas de angstrom de espesor. Las láminas están separadas unas de otras por capas de cationes (iones positivos), como el magnesio. Uno de tales minerales es la vermiculita. George F. Walker, de la División de Mineralogía Aplicada de la Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, ha descubierto que se pueden separar las láminas de silicatos eliminando o reemplazando los cationes y aplicando luego un esfuerzo cortante. El resultado es una gran cantidad de fragmentos de láminas de silicatos formando una suspensión muy densa en agua. La suspensión se puede secar para obtener una película fuerte, flexible, traslúcida y refractaria; o bien, se bate y luego se deja secar para fabricar una espuma inorgánica refractaria muy parecida al polímero orgánico poliestireno. Se ha vuelto a crear, pues, un mineral natural.

La segunda solución al problema de la obtención de materiales inorgánicos refractarios a baja temperatura nos la ha traído el estudio de sólidos como el fosfato de aluminio ($AlPO_4$) vítreo. Existe un paralelismo entre el fosfato de aluminio y la sílice, la cerámica refractaria inorgánica arquetípica, pues, de hecho, exhiben formas cristalinas similares. Es virtualmente imposible producir fosfato de aluminio vítreo únicamente fundiendo el compuesto, porque éste se descompone antes de fundir. Por otro lado, podemos preparar un precipitado cristalino de composición $AlPO_4 \cdot HCl \cdot (C_2H_5OH)_4$ haciendo reaccionar tricloruro de aluminio ($AlCl_3$) y ácido fosfórico (H_3PO_4) en etanol (C_2H_5OH) a temperaturas inferiores a los cero grados Celsius.

Posee el precipitado una estructura curiosa, que consta de átomos de aluminio, de oxígeno y de fósforo dispuestos en una red cúbica; las moléculas de etanol impiden la unión de los cubos. Al calentar a unos 100 grados Celsius, se elimina el alcohol y los cubos se unen, formando así una red tridimensional de aluminio, oxígeno y fósforo de aspecto vítreo y que resiste los 1600 grados Celsius sin descomponerse. Este vidrio es químicamente inerte e insolu-

7. ESPUMA fabricada a partir de vermiculita, un material inorgánico reciente que puede sustituir a polímeros orgánicos. En la vermiculita, láminas de silicato están separadas por capas de iones magnesio. Los iones se eliminan y las láminas se someten a un esfuerzo cortante, luego la pasta resultante se bate y se seca para producir la espuma. Esta micrografía realizada con un microscopio electrónico de barrido tiene un aumento de 75 diámetros.



8. CONCHA DE LA OREJA DE MAR, vista al microscopio electrónico de barrido. Es caliza casi en su totalidad (carbonato de calcio, o $CaCO_3$), más rígida que el aluminio y más tenaz que el plexiglás. Lo que confirma que los materiales inorgánicos pueden recibir nuevas y útiles propiedades. La concha consta de placas de carbonato de calcio que tienen un espesor de 0,2 micrometros y están separadas entre sí mediante una delgada capa de proteína.

ble, pero el precipitado a partir del que se obtiene es soluble tanto en agua como en disolventes orgánicos. Por ello el precipitado se puede disolver y calentar, dando lugar a recubrimientos vítreos. Además, el precipitado contribuye a la unión de las partículas de compuestos tales como la alúmina (Al_2O_3), creando una cerámica a temperaturas próximas a los 100 grados.

Mediante las técnicas citadas, desarrolladas por B. E. Yoldas, de los Westinghouse Research Laboratories y por Masayuki Yamane y Tesuo Sakaino, del Instituto de Tecnología de Tokyo, se fabrican vidrios a baja temperatura a partir de alcóxidos: compuestos que aparecen a partir de reacciones entre un alcohol y un ácido inorgánico. El metanol (CH_3OH), por ejemplo, reacciona con el ácido silícico ($Si(OH)_4$) para dar alcóxido de silicio ($Si(OCH_3)_4$) y agua. Si el alcóxido reacciona con el agua, se transforma en un óxido y en un alcohol. El alcohol puede eliminarse mediante un ligero calentamiento, obteniéndose un óxido vítreo. En principio, este vidrio se puede reforzar con fibras orgánicas que tengan una baja temperatura de fusión, técnica inaplicable en la fabricación del vidrio a temperatura elevada.

Tal como el cemento antes descrito, el vidrio producido a baja temperatura es poroso. También en este caso los poros son pequeños, característica que apenas condiciona las propiedades físicas. En la fabricación de vidrio se persigue controlar no sólo las propiedades mecánicas del material, sino también las propiedades ópticas. En particular, si el vidrio se aplica para la transmisión de luz, la transparencia de éste requiere que el tamaño de los poros sea inferior a la longitud de onda de la luz transmitida. Muchos de los vidrios producidos por Yoldas son muy transparentes y el tamaño de sus poros no excede los 100 angstrom.

En las técnicas descritas, la química inorgánica intenta contribuir a la conservación de la energía y de los hidrocarburos, mediante la utilización de compuestos químicos inorgánicos a baja temperatura. Esta tecnología viene auspiciada por los avances en el conocimiento de ciertas propiedades materiales, la porosidad entre ellas. Resulta curioso que la importancia del control de la porosidad no se había detectado empleando las técnicas de fabricación a temperaturas elevadas. Quizá resulte demasiado prematuro hablar de un nuevo Neolítico, pero sus inicios están aquí.

Métodos estadísticos intensivos por ordenador

A costa de grandes cálculos, se prescinde de hipótesis convencionales sobre los datos. El método "autodocimante" ha hecho reconsiderar muchas estimaciones sobre la fiabilidad de inferencias científicas

Persi Diaconis y Bradley Efron

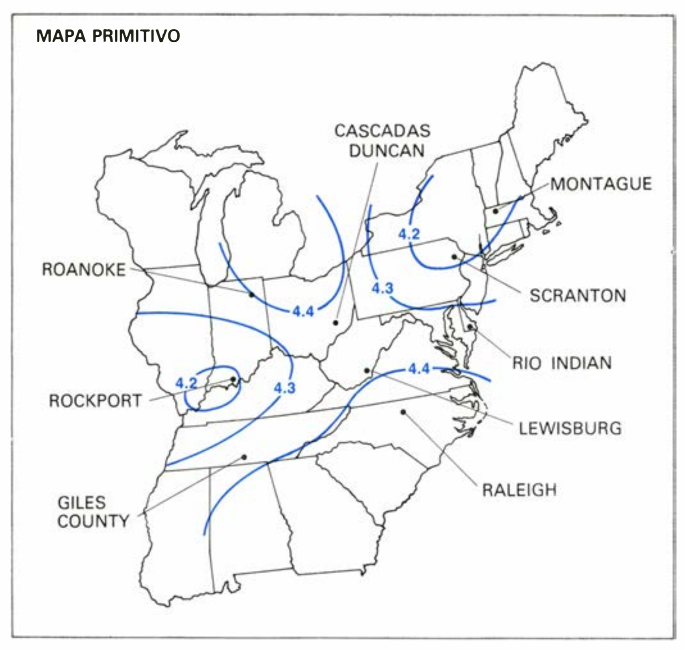
Casi todos los métodos estadísticos de uso común en nuestros días se concibieron y desarrollaron entre 1800 y 1930, época en que las tareas de cómputo eran lentas y costosas. La computación es hoy rápida y económica; la diferencia entre aquellos y estos tiempos se mide en múltiplos de millón. A lo largo de los últimos años han ido surgiendo nuevas teorías estadísticas que sacan partido de la gran velocidad de los ordenadores digitales. Los nuevos métodos dilapidan a un ritmo fantástico la capacidad de cómputo, pudiendo perfectamente consumir un millón de operaciones aritméticas para analizar una nube de datos de sólo 15 puntos. El beneficio que tan intenso esfuerzo de cálculo nos reporta es la liberación de dos factores limitantes que han estado gravitando sobre las teorías estadísticas desde sus orígenes mismos: la hipótesis de que los datos se ajustan a una curva campaniforme y la necesidad de concentrar los esfuerzos sobre medidas estadísticas de propiedades teóricas susceptibles de ser analizadas matemáticamente.

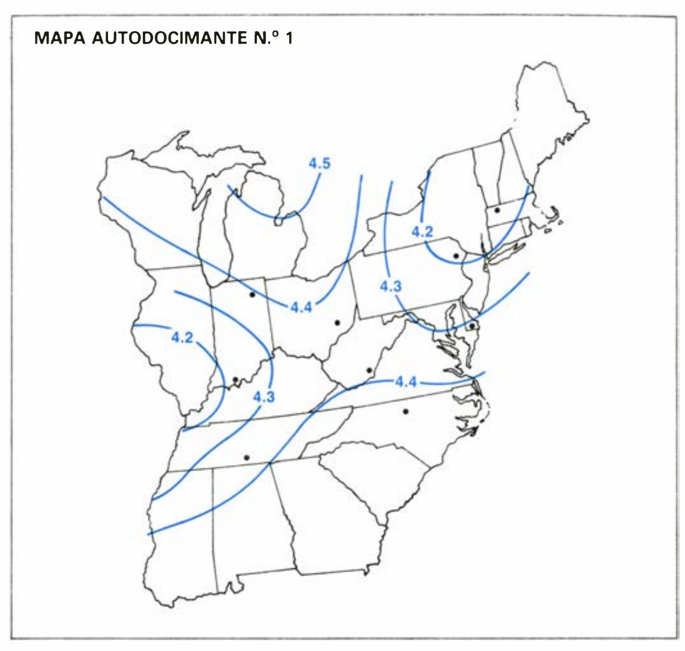
Nuevos desarrollos con profundas consecuencias e implicaciones en todas las ciencias, porque la teoría estadística se dirige en último término a una cuestión fundamental: ¿Cómo se puede conocer qué es lo verdadero? Supongamos que una cierta magnitud se haya medido 15 veces, obteniéndose 15 valores que difieran moderadamente entre sí. ¿Cuál será la aproximación óptima al verdadero valor? Los métodos de la estadística permiten responder a tal cuestión, e incluso dar una estimación cuantitativa de la confianza que tal estimación merece. Dado que las observaciones empíricas están casi siempre expuestas a padecer errores, es frecuente que tanto en el campo científico como en otros muchos las conclusiones hayan de fundarse en mediciones estadísticas de lo verdadero. Por consiguiente, es de esperar que todo desarrollo que logre hacer más versátiles o más precisas las inferencias estadísticas tenga amplias repercusiones.

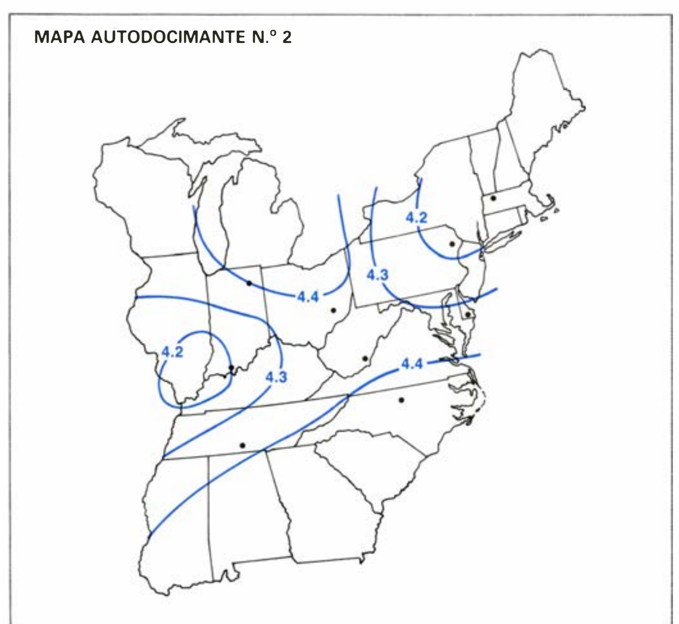
Para mejor apreciar las dos ventajas que los nuevos métodos reportan, tal vez lo más conveniente sea compararlos con los antiguos. Ante todo, en los métodos antiguos era por lo común necesario admitir ciertas hipótesis imposibles de verificar antes de proceder al análisis estadístico. Tales hipótesis solían aludir a la curva campaniforme representativa de la distribución normal, o distribución de Gauss, así llamada en honor del matemático alemán Carl Friedrich Gauss. Al utilizar la distribución de Gauss se presupone que las fluctuaciones aleatorias –los errores– de los valores experimentales observados de una cierta magnitud se encuentran simétricamente esparcidos en torno al verdadero valor de la magnitud. Se presume, además, que cuanto mayor sea el error entre el valor experimental y el verdadero, tanto menos verosímil es que tal valor experimental se registre. La experiencia ha mostrado que la teoría gaussiana funciona notablemente bien, incluso cuando el ajuste a ella de los datos es tan sólo grosero; ésta es la razón de que los estadísticos puedan dar predicciones dignas de confianza aún careciendo de ordenadores. Empero, para series de datos que no verifiquen las hipótesis gaussianas, los resultados obtenidos por métodos estadísticos que sí se fundan en ellos son –lógicamente– menos de fiar. Los métodos intensivos por ordenador (u ordenador-intensivos) pueden resolver la mayoría de los problemas sin necesidad de suponer que los datos tienen distribución normal.

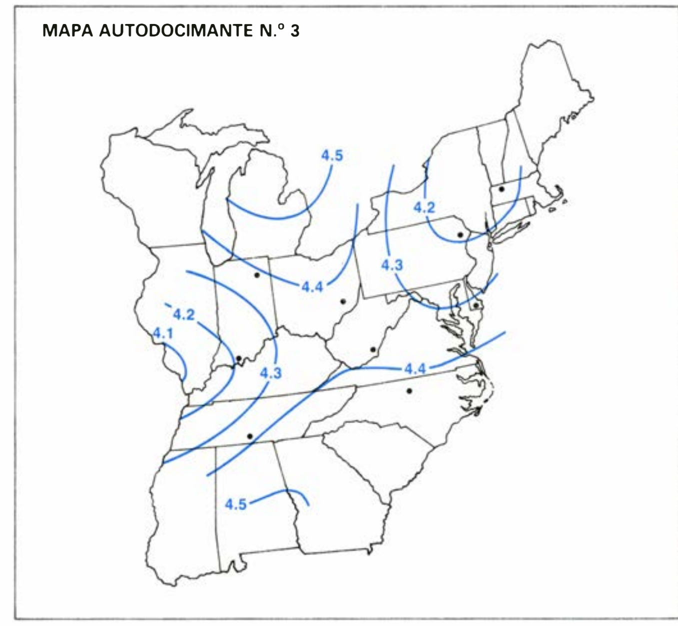
Poder prescindir de las hipótesis gaussianas es ya todo un hito en estadística, pero todavía mayor fuerza liberadora conlleva la segunda de las ventajas ofrecidas por las nuevas técnicas. En los viejos tiempos, las operaciones aritméticas asociadas al análisis estadístico se hacían a mano o con ayuda de una calculadora de sobremesa. Tales cálculos se simplifican inmensamente si las fórmulas en que se basan hallan expresiones analíticas sencillas. Por ello, la teoría estadística ha tendido a concentrarse en unas cuantas propiedades de las muestras: la media, la desviación típica o el coeficiente de correlación, susceptibles de fácil manipulación analítica. No obstante, otras muchas propiedades de la muestra, de interés grande para el estadístico, se encuentran fuera del alcance del análisis mate-

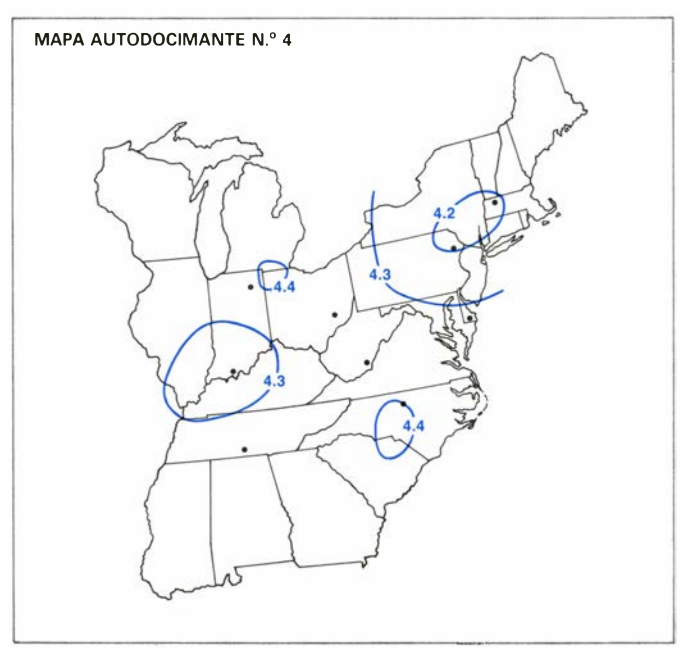
1. ALTA VARIABILIDAD de las isolíneas de un mapa, puesta de manifiesto gracias al método de autodocimasia. Este método requiere tan gran volumen de cálculo que sólo es factible con auxilio de ordenador. El mapa del ángulo superior izquierdo se construyó a partir de 2000 mediciones del *p*H (medida de la acidez) de todas las precipitaciones recogidas en nueve estaciones meteorológicas a lo largo de dos años. (Cuanto menor sea el *p*H mayor será la acidez.) Las líneas de *p*H constante fueron trazadas según un procedimiento que bajo ciertas hipótesis puede demostrarse que es óptimo. Empero, los 2000 puntos-dato están sometidos a considerable fluctuación de carácter aleatorio; las isolíneas basadas en otra muestra de 2000 mediciones tomadas sobre la misma región pudieran tener aspecto muy diferente. El método autodocimante ("bootstrap"), inventado por uno de los autores (Efron), permite estimar, a partir del conjunto único de los 2000 puntos-dato, el grado de variabilidad que presentarían las isolíneas si pudieran compararse muchos conjuntos de 2000 puntos. Los resultados de cinco cálculos por autodocimasia, efectuados con ayuda de ordenador por Barry P. Eynon y Paul Switzer, ambos de la Universidad de Stanford, se aprecian en los otros cinco mapas. La variabilidad de los contornos nos insta a una interpretación cauta del mapa primitivo. Ciertos pasillos de baja acidez pueden convertirse en islotes en mapas sucesivos.

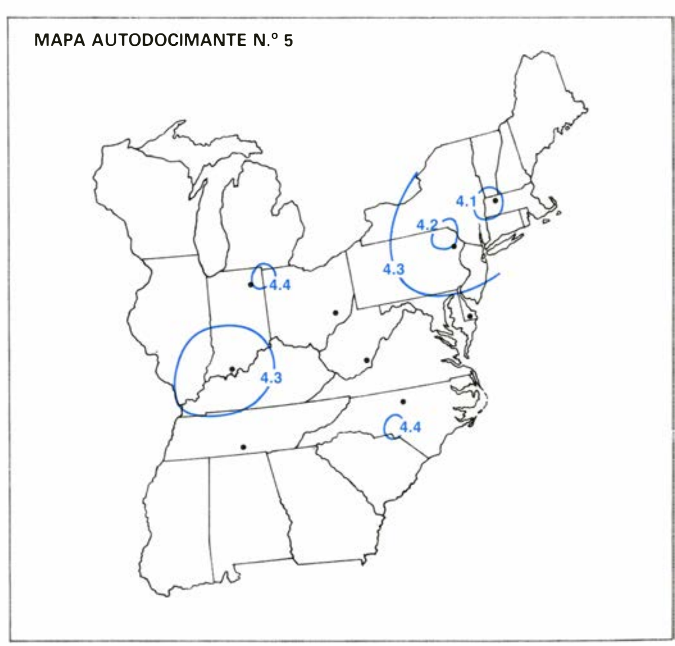

MAPA PRIMITIVO
CASCADAS
DUNCAN
MONTAGUE
ROANOKE
SCRANTON
RIO INDIAN
ROCKPORT
LEWISBURG
RALEIGH
GILES
COUNTY
4.2
4.3
4.4
4.2
4.3
4.4
4.2
4.3


MAPA AUTODOCIMANTE N.º 1
4.5
4.2
4.3
4.4
4.2
4.3
4.4


MAPA AUTODOCIMANTE N.º 2
4.2
4.3
4.4
4.2
4.3
4.4


MAPA AUTODOCIMANTE N.º 3
4.5
4.2
4.3
4.4
4.2
4.1
4.3
4.4
4.5


MAPA AUTODOCIMANTE N.º 4
4.2
4.3
4.4
4.3
4.4

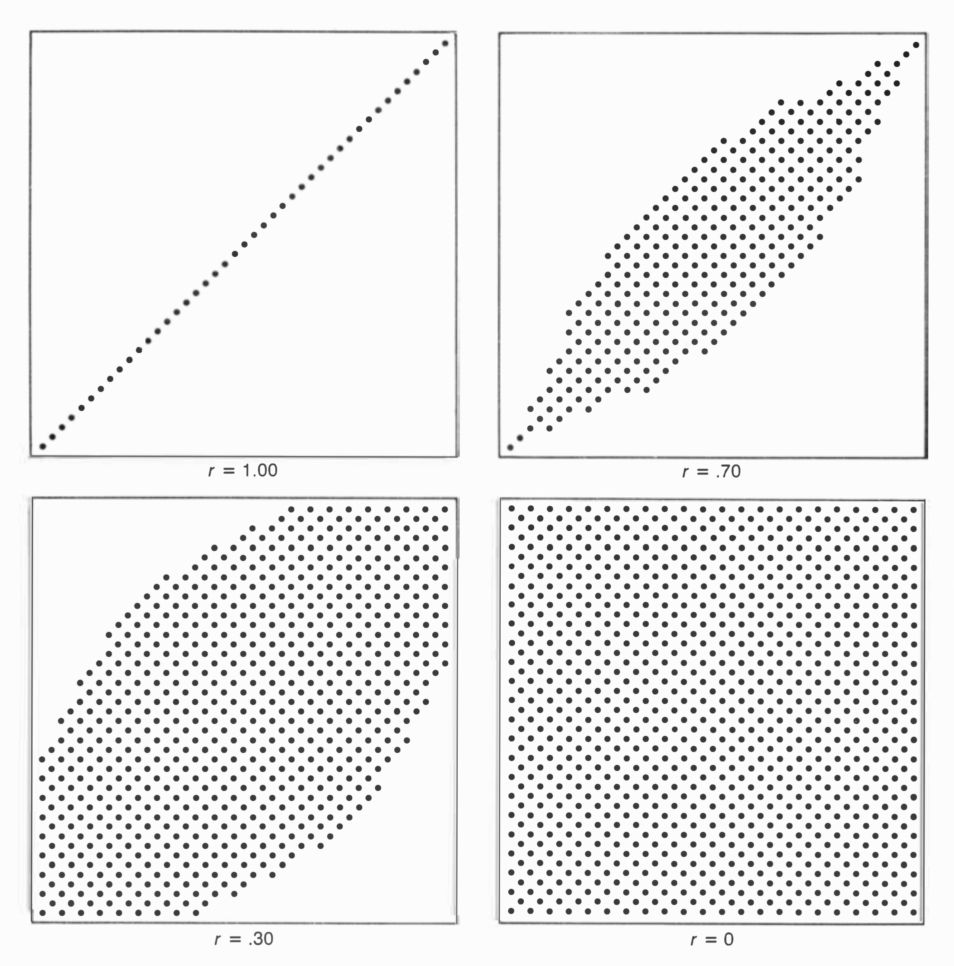

MAPA AUTODOCIMANTE N.º 5
4.1
4.2
4.3
4.4
4.3
4.4

mático exacto; los nuevos métodos fundados en ordenador posibilitan la exploración numérica de las mismas, a pesar de que su análisis exacto sea por el momento imposible. Así pues, los nuevos métodos dan libertad al estadístico para abordar problemas más complejos, sacando partido de una amplia panoplia de instrumental estadístico.

Para ilustrar la aplicación de los ordenadores a la inferencia estadística hemos elegido un problema donde sólo aparecen 15 puntos-dato. Aplicaremos un método llamado "bootstrap" (y que aquí traducimos por "autodocimante") inventado por uno de nosotros (Efron) en 1977, de muy sencilla descripción, aunque depende tanto del ordenador que hubiera sido inconcebible 30 años atrás.

Imaginemos un grupo de 15 facultades de derecho, de las cuales se miden dos características globales, correspondientes a sus alumnos de nuevo ingreso, a saber, el promedio de puntuaciones de la Prueba de Acceso a la Universidad (PAU) y la puntuación media alcanzada por los candidatos en el Test de Admisión a Facultades de Derecho (TFD). Parece razonable suponer que ambas medidas sean sensiblemente proporcionales: las nuevas promociones de calificaciones PAU elevadas muestran tendencia hacia elevadas puntuaciones medias en la TFD. Es en cambio inverosímil que tal proporcionalidad sea exacta; las nuevas promociones de algunas facultades pueden exhibir altas PAU frente a TFD bajas, mientras que en otras la situación puede ser inversa. El estadístico desea ante todo conocer qué grado de proximidad existe entre los cocientes de ambas medidas y la proporcionalidad estricta. Además, el estadístico debe tratar de estimar hasta qué punto justifican los datos disponibles la extrapolación del primer resultado a todas las demás facultades de derecho. En breve, ¿qué confianza se puede tener en que la muestra de 15 facultades dé una imagen ajustada del colectivo entero de facultades de derecho?

La medida normalizada de la tendencia hacia la proporcionalidad entre dos variables, tales como la PAU y el TFD, es el coeficiente de correlación, habitualmente denotado por la letra r. Supongamos que los datos correspondientes a las facultades se representen gráficamente en un sistema de ejes, donde el vertical representa PAU y el horizontal TFD. El coeficiente de correlación mide hasta qué grado los puntos de un tal gráfico tienden a apiñarse en torno a una recta. Cuando los puntos se encuentran dispersos al azar puro, el valor de r es igual a 0; dicho valor tiende hacia 1 o hacia -1 conforme los puntos van apiñándose en torno a una recta de pendiente positiva o negativa. (La pendiente de una recta es positiva si ésta va subiendo conforme se avanza hacia la derecha, y negativa si la recta se inclina hacia abajo y la derecha.) La correlación, por ejemplo, entre grados Fahrenheit y grados Celsius es igual a 1, porque los incrementos de una y otra magnitudes son directamente proporcionales. La correlación entre las estaturas de los padres y las de sus hijos se encuentran en torno a 0,5. Los padres altos propenden a tener hijos también altos, pero la correspondencia no es exacta. Se ha demostrado que la correlación entre el consumo diario de cigarrillos y la esperanza de vida es negativa; es decir, cuanto mayor es el consumo diario de cigarrillos tanto menor es la esperanza de vida.

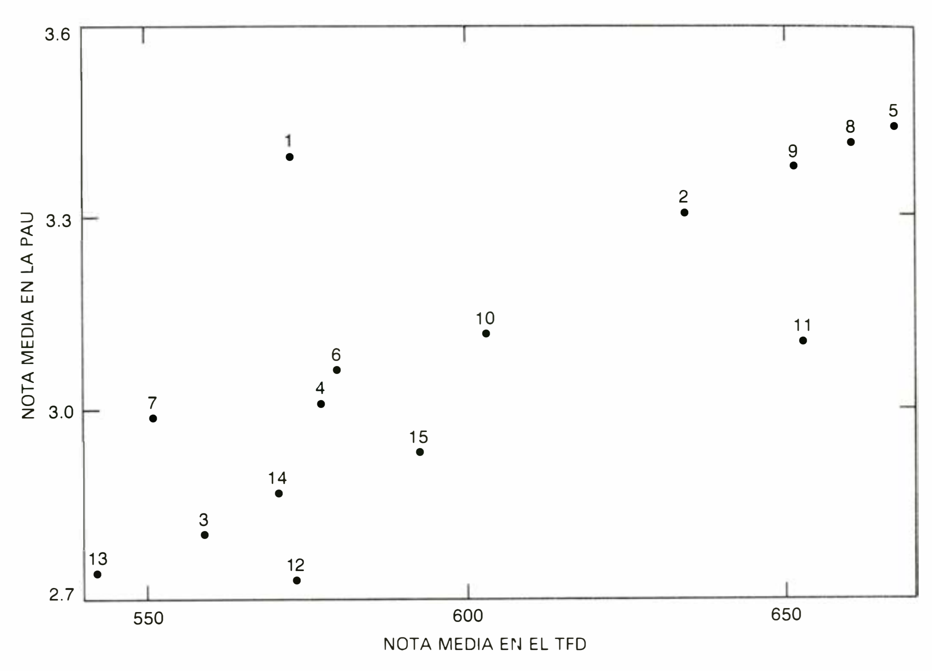


2. COEFICIENTE DE CORRELACION: una medida de la tendencia de los puntos-dato, representados con respecto a unos ejes, a apiñarse en torno a una recta. Se simboliza con la letra *r*; toma cualquier valor comprendido entre −1 y 1. Cuanto más lineal sea la nube de puntos, tanto mayor es el valor absoluto de *r*.

La correlación observada entre PAU y TFD en las quince facultades de derecho, medidas en 1973, fue de 0,776. Dicho de otra forma, se observa una fuerte correlación entre las dos variables y, en los puntos definidos por las dos coordenadas de cada facultad, una fuerte tendencia a agruparse en torno a una recta de pendiente positiva. Para calcular el valor de r se utilizó un procedimiento matemático sencillo, que con una calculadora de sobremesa no exigiría arriba de cinco minutos. Los detalles del cálculo carecen aquí de interés; baste saber que dan un valor de r único y bien definido para toda colección de puntos-dato.

¿Qué fundamento tenemos, sin embargo, para presumir que el valor de r estará cercano a 0,776 al tomar el conjunto de todas las facultades de derecho? Después de todo, la muestra podría ser sumamente atípica con relación a la generalidad de tales facultades. La ley de los grandes números garantiza que, para muestras extensas, la estimación estadística de r calculada a partir de la muestra tiende muy probablemente al verdadero valor de r de la población completa. No obstante, de una muestra de 15 facultades no puede decirse que sea extensa. Por tanto, se necesita alguna medida que nos indique la precisión estadística del valor de r dado por la muestra, a saber, 0,776. La "autodocimasia" se propone, justamente, proporcionar una tal medida.

Para comprender qué significa precisión estadística al hablar de valores estimados, como el de r, supongamos que se dispone de datos para otros conjuntos de 15 facultades, distintos de los conjuntos de muestras ya examinados. Para cada uno de estos conjuntos podríamos calcular el valor de r, y describirse consiguientemente cuál es la magnitud de las fluctuaciones de r correspondientes a muchas muestras. Por ejemplo, si el 99 por ciento de los valores de r calculados para las hipotéticas muestras se encontrasen entre 0,775 y 0,777 podríamos atribuir gran precisión al valor 0,776. Por otra parte, si los valores de r se encontrasen uniformemente dispersos entre -1 y 1, la estimación de r calculada de la muestra inicial carecería por completo de precisión y sería totalmente inútil. Dicho de otra forma, la exactitud estadística de un valor estimado de r depende de la amplitud del intervalo capaz de encerrar a los valores estimados asociados con un determinado porcentaje de la totalidad de las muestras. Desafortunadamente, se carece por lo general de los datos necesarios para calcular los valores r proporcionados por muchas muestras diferentes. Así pues, dado que la finalidad del ejemplo de las facultades es reflejar las condiciones reales de trabajo en estadística, supondremos por el momento que la única información disponible es la concerniente a la muestra primitiva de 15 facultades. En efecto, si se dispusiera de más datos podríamos utilizarlos para dar una estimación de r mejor que 0,776.



3. DOS MEDIDAS del rendimiento académico potencial de los alumnos de nuevo ingreso de 15 facultades de derecho norteamericanas, representadas gráficamente para cada facultad. Cada punto del gráfico denota las calificaciones medias de los alumnos de cada facultad en la Prueba de Acceso a la Universidad (PAU) y en el Test Específico de Facultades de Derecho (TFP). El gráfico indica que, para esta muestra de 15 facultades, ambas medidas tienden a ser proporcionales: su coeficiente de correlación es 0,776. Interesaría saber hasta qué punto el valor 0,776 se aproxima al verdadero valor de *r* correspondiente a la totalidad de facultades norteamericanas de leyes; es decir, conocer hasta qué punto, en promedio, el valor de *r* observado para una muestra aleatoria de 15 facultades de leyes difiere del verdadero valor de *r*.

El método autodocimante ("bootstrap") estima la precisión estadística de r a partir de los datos de una única muestra. La idea consiste en remedar el proceso de selección de muestras de tamaño 15 con el fin de hallar la probabilidad de que sus coeficientes de correlación caigan en el interior de diversos intervalos. Las muestras son generadas a partir de los datos de la muestra original. El nombre "bootstrap" alude al viejo chiste de izarse a uno mismo tirando hacia arriba de las tirillas de las botas, y refleja el hecho de que a partir de una sola muestra, sin más ayuda, se generan otras muchas más. (El término "dócima" y "docimasia" fue introducido por Enrique Cansado, quien los explica y justifica en su introducción a la famosa obra de H. Cramer "Métodos matemáticos de Estadística", Ed. Aguilar. N. del T.)

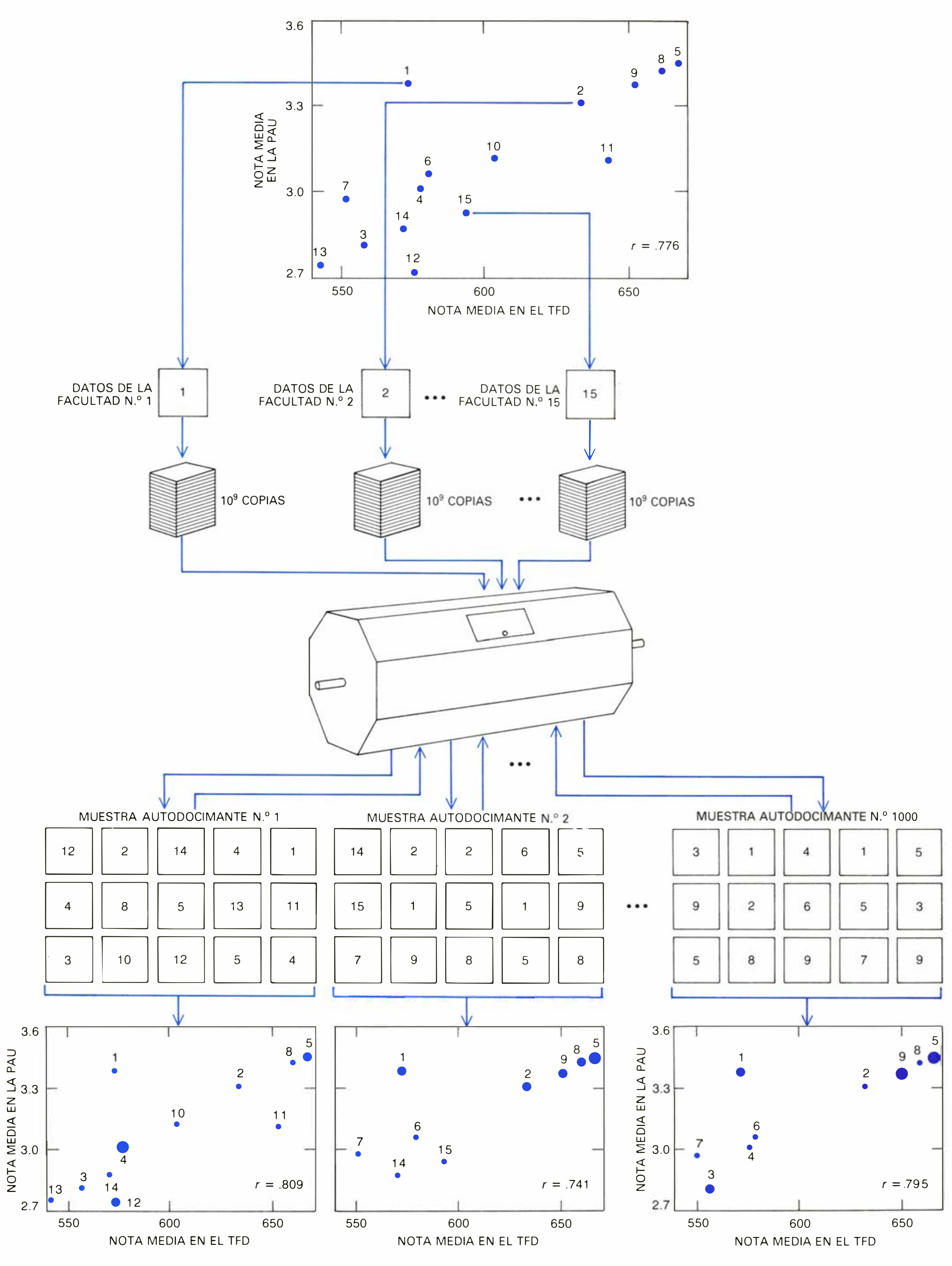
En efecto, las muestras autodocimantes se engendran como sigue: Los datos de la primera facultad se copian un número enorme de veces, mil millones, pongamos por caso, y lo mismo se hace con los datos de las otras catorce. Las 15.000 millones de copias resultantes se mezclan concienzudamente. Se seleccionan entonces al azar muestras de tamaño 15, y se calcula para cada muestra su coeficiente de correlación. En un ordenador, los pasos de copiar, mezclar y seleccionar nuevos conjuntos de datos se realizan por procedimientos más rápidos, aunque matemáticamente equivalentes: el ordenador asigna un número a cada una de las facultades y a continuación engendra las muestras emparejando una serie de números aleatorios a los números correspondientes a las diversas facultades.

Las muestras así generadas serán llamadas "muestras autodocimantes". La distribución de los coeficientes de correlación de las muestras autodocimantes puede ser tratada como si fuera una distribución construida a partir de muestras reales: da una estimación de la precisión estadística del valor de r que fue calculado para los datos iniciales. A partir de las quince facultades de la muestra, generamos nosotros 1000 muestras autodocimantes; de estas 1000 muestras, 680, o sea el 68 por ciento, mostraron coeficientes de correlación situados entre 0,654 y 0,908. La longitud de este intervalo, o sea, 0,254, es la medida autodocimante de la precisión de r correspondiente a la muestra. La semiamplitud del intervalo, 0,127, puede interpretarse como estimación del valor medio con que el valor de r observado para una muestra aleatorio de tamaño 15 difiere del verdadero valor de r.

Vale la pena observar que la precisión estadística no puede ser definida simplemente como la precisión de una estimación individual, 0,776 por ejemplo, esto es, la diferencia entre el valor estimado y el valor verdadero de r. En un problema real tal diferencia nunca puede conocerse; si lo fuera, el problema desaparecería, porque sin más que restar de la estimación tal diferencia tendríamos determinado exactamente el verdadero valor. La precisión estadística se refiere, en cambio, a la magnitud media de la desviación entre el valor estimado y el valor verdadero.

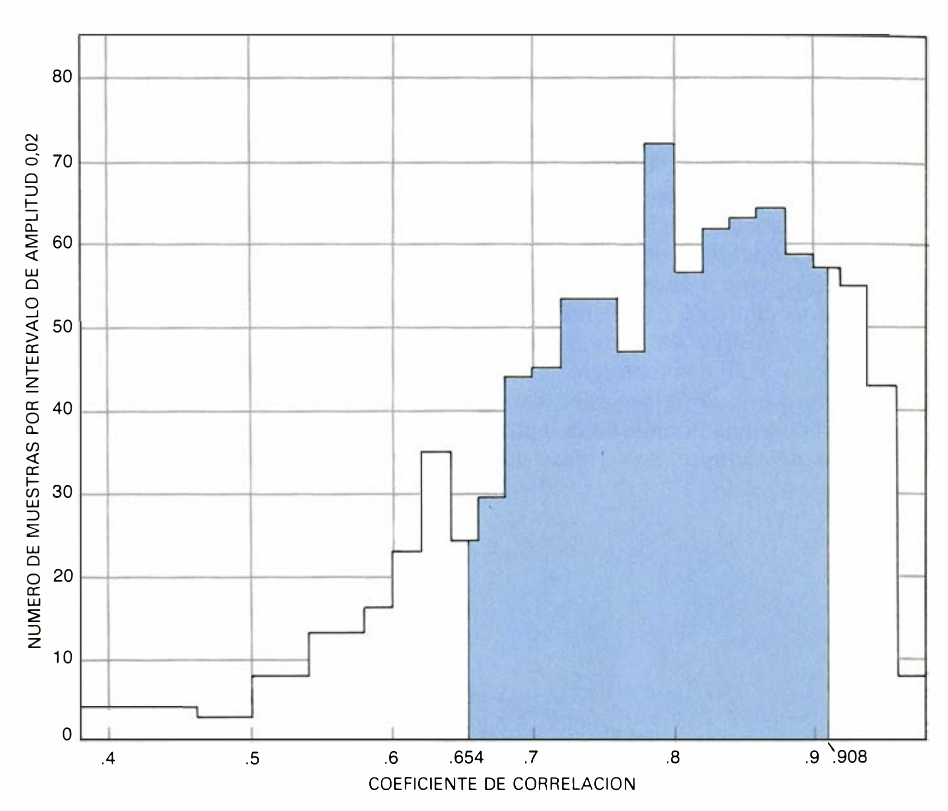
Si los resultados de la distribución autodocimante pueden ser tomados como medida de la precisión estadística del valor primitivamente estimado, entonces, aunque la estimación de 0,776 sea grosera, no carece por completo de valor. El verdadero coeficiente de correlación, es decir, el valor de r correspondiente a la totalidad de las facultades de derecho, podría muy bien ser 0,6 o ser 0,9, pero desde luego no es cero. Trabajos teóricos nuestros ponen de manifiesto que la medida autodocimante de la precisión estadística proporciona resultados fiables en un abanico de situaciones muy amplio.

Podemos ahora salir de la ignorancia que voluntariamente nos impusimos,



4. APLICACION DEL METODO AUTODOCIMANTE a la muestra de 15 facultades que se ve en la figura 3, al objeto de evaluar la precisión del coeficiente de correlación calculado para la muestra. Cada dato de cada facultad se copia un gran número de veces, mil millones por ejemplo. Los 15.000 millones de copias se mezclan entonces a conciencia. Seleccionando al azar conjuntos de 15 puntos-dato, se crean muestras artificiales, llamadas muestras para autodocimasia, o muestras "bootstrap". Seguidamente, se calcula el valor de *r* para cada una de estas muestras ficticias. Aunque de concepción sencilla, la aplicación del método de autodocimasia requiere un volumen de cálculo tan ingente que no resulta viable su aplicación sin la ayuda de un ordenador.

ya que en el caso de las facultades de derecho la precisión del coeficiente de correlación se comprueba directamente. En efecto, elegimos tal ejemplo porque disponíamos de datos completos de todas las puntuaciones medias de PAU y TFD de los alumnos de las facultades de derecho norteamericanas del año 1973. Había por entonces en Estados Unidos 82 facultades; el coeficiente de correlación entre PAU y TFD resultó aquel año ser de 0,761. (Por consiguiente, 0,761 es el verdadero valor de *r* al que antes nos referimos; en la mayoría de los casos tal valor no podrá ser conocido.) Reviste mayor importancia que pueda calcularse la verdadera precisión estadística de la estimación obtenida a partir de la muestra original, porque es factible determinar la distribución de los valores de *r* para muchas muestras verdaderas de tamaño 15. Hay 82^{15} –alrededor de 5×10^{28}– maneras equivalentes y equiprobables de extraer muestras aleatorias (con repetición) de tamaño 15 de entre las 82 facultades. En teoría, podría calcularse el valor de *r* para cada una de las muestras; así, para intervalos de tamaño igual representaríamos gráficamente el número de muestras para las cuales *r* cae dentro de un intervalo pequeño. La gráfica resultante es la llamada distribución de frecuencias.



5. DISTRIBUCION DE FRECUENCIAS del coeficiente de correlación *r*, representada gráficamente aquí para 1000 muestras de autodocimasia. Entre las medidas más aceptadas de la precisión de estimadores estadísticos –*r* constituye uno de ellos– está la anchura de la banda que, situada bajo la parte central de su distribución de frecuencias, determine un área igual al 68 por ciento del área total limitada por la gráfica de la distribución. La banda central de la distribución obtenida por autodocimasia aparece aquí coloreada; su anchura es 0,254. La mitad de la anchura del intervalo es 0,127, que nos ofrece una buena estimación del valor promedio en que el valor observado de *r* difiere del verdadero valor de *r*.

En la práctica, la distribución de frecuencias para muestras de tamaño 15 seleccionadas de entre las 82 facultades tan sólo puede ser determinada aproximadamente; un ordenador que hubiese comenzado a trabajar en la determinación de *r* para cada una de las 82^{15} muestras en el instante de la "gran explosión" que dio nacimiento al universo, efectuando mil millones de determinaciones por segundo, no habría concluido todavía la tarea. No es ese el camino, por supuesto, sino que se calcula *r* para un número grande, aunque manejable, de muestras de tamaño 15 seleccionadas al azar; un millón de casos, por ejemplo.

Descubrimos que el 68 por ciento de los coeficientes de correlación calculados para un millón de muestras se encontraban agrupados entre 0,606 y 0,876, intervalo de amplitud 0,270. Dicho de otra forma, si se selecciona al azar una muestra de 15 facultades, la probabilidad de que su coeficiente de correlación caiga entre 0,606 y 0,876 es de 0,68. Obsérvese que la amplitud del intervalo está bastante acorde con el definido por el 68 por ciento de las muestras autodocimantes, a pesar de que los extremos de ambos intervalos tienen valores que coinciden sólo aproximadamente.

Resulta que tal coincidencia no es en modo alguno accidental. Investigaciones teóricas realizadas por Rudolph J. Beran, Peter J. Bickel y David A. Freedman, de la Universidad de California en Berkeley, Kesar Singh, de la Universidad de Rutgers, y los autores, en la Universidad de Stanford, muestran que para el coeficiente de correlación y para otra amplia gama de estadísticos, el intervalo de confianza asociado a la distribución "bootstrap" y el asociado con la distribución de muestras reales poseen casi iguales amplitudes. (Es corriente comparar los intervalos que contienen el 68 por ciento de las muestras, porque, para la curva acampanada correspondiente a la distribución normal, el 68 por ciento de las muestras se encuentran a no más de una desviación típica del pico de la campana.)

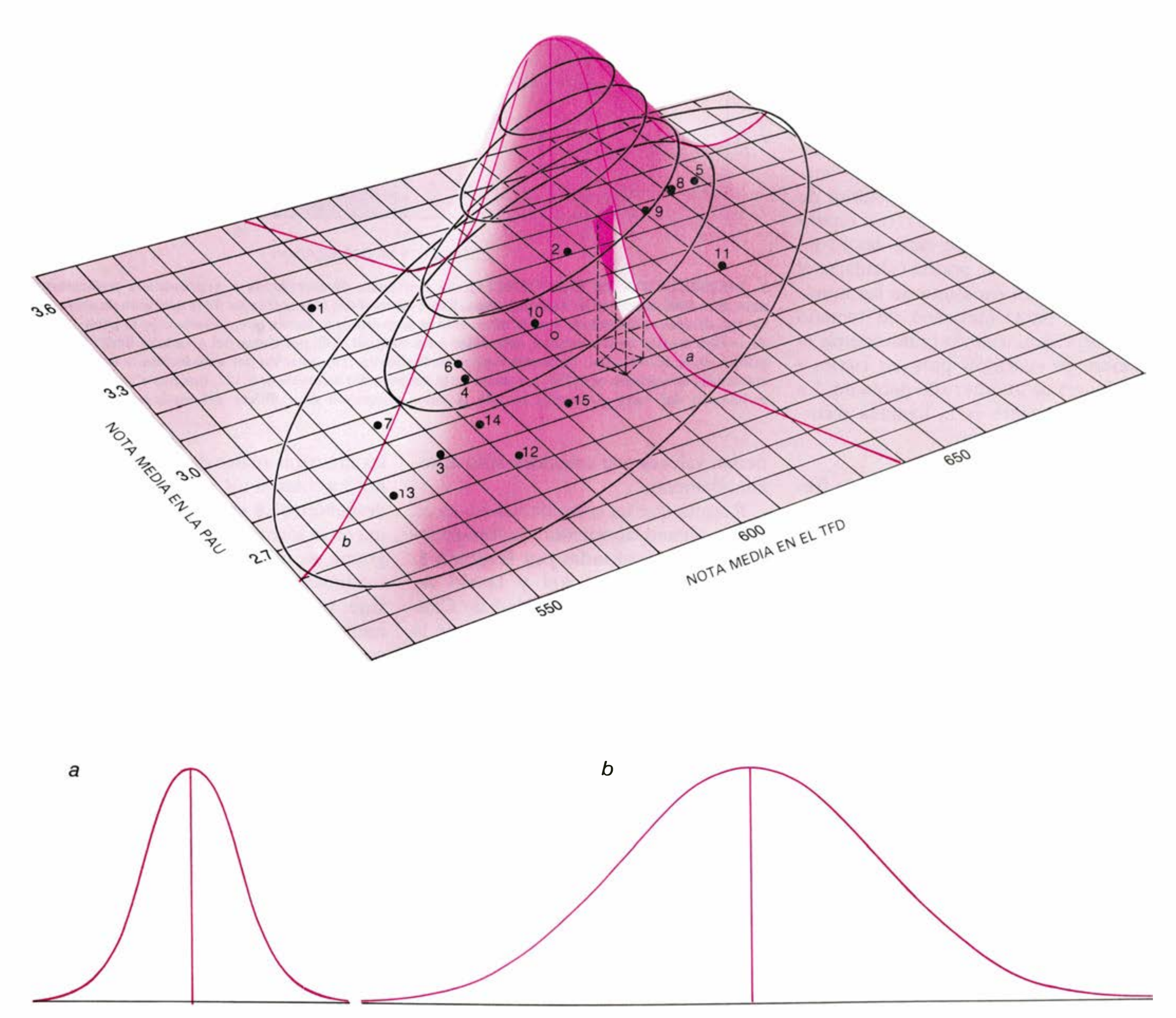
A primera vista, este resultado teórico puede parecer paradójico, pues sugiere que, a partir de la información encerrada en cada muestra, se puede deducir una buena aproximación de la distribución frecuencial del coeficiente de correlación correspondiente a todas las muestras reales de ese mismo tamaño. Es como si los estadísticos hubiesen descubierto un equivalente del holograma en la técnica de muestreo. Un holograma es una configuración de ondas luminosas, preservada sobre una superficie. La escena desde la cual las ondas luminosas son emitidas se reconstruye con gran detalle a partir de la superficie completa del holograma; y, si tal superficie se despedaza, podríamos reconstruir, incluso entonces, la escena completa a partir de los fragmentos. No todas las muestras, sin embargo, se comportan cual fragmentos de holograma; las buenas propiedades que muestra la autodocimasia son buenas propiedades de promedio. Al igual que cualquier otro procedimiento estadístico, la autodocimasia dará, para un pequeño porcentaje de las muestras posibles, respuestas engañosas.

Supongamos que para la muestra de 15 facultades el coeficiente de correlación hubiera sido casi igual a 1. Es decir, supongamos que todos los puntos-dato de la muestra yaciesen perfectamente alineados. Se trata de una circunstancia extraordinariamente improbable, vistos los datos reales correspondientes a las 82 facultades, pero pudiera acontecer. Se seguiría entonces

que toda muestra generada por autodocimasia se encontraría también situada en torno a la misma recta y, por tanto, todos los valores de *r* calculados a partir del procedimiento "bootstrap" serían sensiblemente iguales a 1. La amplitud de intervalo asociado al 68 por ciento de las muestras de autodocimasia sería casi igual a cero. De acuerdo con el procedimiento "bootstrap", la precisión estadística de *r* rondaría la perfección, lo cual es incorrecto.

La imagen que de la precisión estadística proporciona el método de autodocimasia no siempre es verídica. Lo que ha podido demostrarse es que el método ofrece, casi siempre, una imagen correcta de la precisión del valor estimado a partir de una muestra. Siempre quedan muestras para las que el método funciona deficientemente o no funciona; y es imposible saber por adelantada cuáles son. Esta limitación no funciona; y es imposible saber por adelantada cuáles son. Esta limitación condiciones de incertidumbre bajo las que forzosamente ha de desarrollarse el análisis estadístico.

¿Qué ventajas reporta la aplicación del método autodocimante? Para mejor apreciarlas resultará útil describir cómo se calculaba la precisión del coeficiente de correlación (y de otros estadísticos) antes del advenimiento de los ordenadores. Aquel procedimiento puede describirse a través del "bootstrap", aunque inútil es decir que antes de inventarse las computadoras los estadísticos no caracterizaban sus métodos en tales términos. En 1915, Sir Ronald Fisher determinó teóricamente la precisión de *r*. Para ello, tuvo que suponer que los datos de dos variables, en nuestro ejemplo PAU y TFD, se tomaron al azar de una población con distri-



6. SUPERFICIE CAMPANIFORME, utilizada por Sir Ronald Fisher en 1915 en su método para estimar, a partir de una única muestra, cuánto varía el coeficiente de correlación de muestra en muestra. Para efectuar tal estimación por el método de Fisher es necesario suponer que todos los puntos-dato de la muestra han sido seleccionados de acuerdo con probabilidades ofrecidas por la superficie campaniforme. Tal superficie se ha construido de forma que su adaptación a los datos de la muestra sea óptima. En el ejemplo de las facultades universitarias, la cúspide de la superficie ha de hallarse directamente situada sobre el punto del plano cuyas coordenadas sean los valores medios de las pruebas de acceso a la universidad y del test de las facultades de leyes de la muestra (*circulito central*). La pendiente y la orientación de la superficie con respecto al plano de la nube de puntos-dato depende de la dispersión de los datos. Las líneas de nivel de la superficie son elípticas; las secciones transversales son a su vez curvas campaniformes de amplitud variable; vemos dos secciones de éstas en la parte baja de la ilustración. El método de Fisher podría interpretarse como una elección de muestras autodocimantes seleccionadas de entre la totalidad de puntos del plano de la gráfica. La probabilidad de elegir un punto en el interior de una región de la gráfica equivale al cociente de dividir el volumen encerrado entre esa región y la superficie campaniforme (volumen del "pozo") y la totalidad del volumen encerrado entre la superficie y la gráfica. Llevando a cabo el muestreo "bootstrap" con ordenador tan sólo para los puntos individuales y aislados de la muestra original se elimina la hipótesis de que la distribución de probabilidad haya de ajustarse a la superficie campaniforme, llamada distribución normal.

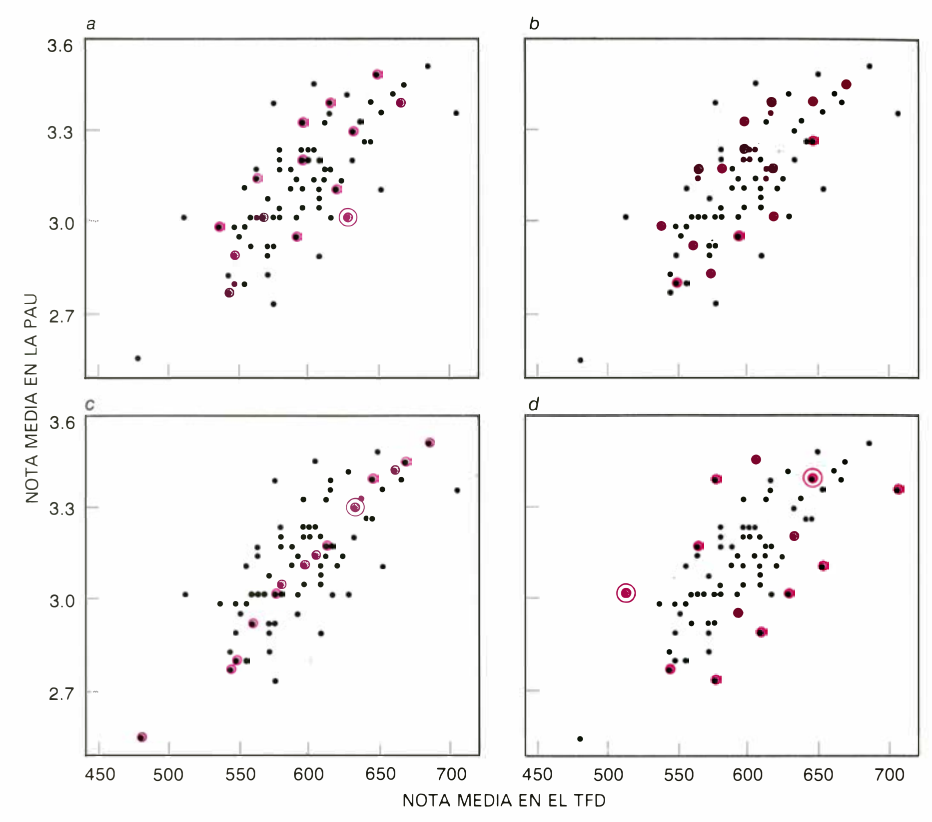
bución normal, que ahora viene representada por una superficie campaniforme, análoga bidimensional de la curva campaniforme correspondiente a la distribución normal. Existe una familia de tales superficies, cuya forma y orientación puede ser ajustada para que se adapte al conjunto de datos disponibles. En el ejemplo de las facultades de derecho, para ajustar la superficie a los datos, se coloca la cima de la campana sobre el mismo punto del gráfico donde PAU y TFD alcanzan cada uno sus valores medios globales. Las laderas de la superficie descienden con pendientes que dependen de la dispersión de los puntos-dato [*véase la figura 6*].

La superficie campaniforme se interpreta como distribución de probabilidad, de forma análoga a como la gráfica de los valores de *r* correspondientes a muestras del colectivo de facultades de derecho es una distribución de frecuencias. La probabilidad de que al tomar un punto del gráfico de calificaciones PAU y TFD éste vaya a caer en cierta región es igual al volumen situado por debajo de la superficie campaniforme y directamente sobre tal región, dividido por el volumen total comprendido entre la superficie y la gráfica. Fisher generó una distribución para los valores de *r*, por autodocimasia, a partir de la distribución de probabilidad normal presentada por la superficie campaniforme. En efecto, se seleccionan del gráfico muchas muestras de 15 puntos-dato, de acuerdo con la probabilidad ofrecida por la situación que ocupen bajo la superficie acampanada, se calcula el valor de *r* correspondiente a cada muestra y se representa gráficamente una distribución de los valores de *r*. Con el método de Fisher, la anchura del intervalo que contiene al 68 por ciento de los valores de *r* es 0,226, lo que concuerda bastante bien con el valor auténtico, 0,270, pero no tanto como el valor estimado por "bootstrap", que es 0,254.

Podemos efectuar analíticamente lo más grueso del cálculo de Fisher, porque se supone que los datos de la muestra se han tomado de una distribución normal de probabilidad. Esta hipótesis constituye, sin embargo, una desventaja del método, pues muy bien pudiera no ser cierta. No lo es, desde luego, en el ejemplo de las facultades de derecho. Además, aún siendo cierta, no se dispone de un procedimiento sencillo para verificar que lo sea; en casi todos los casos haría falta una muestra mucho mayor que la allí aportada, tal vez cientos de datos, para comprobar que la forma de la superficie es la supuesta.

Los cálculos que exige el método de autodocimasia, en el que no se hacen hipótesis simplificadoras acerca de la distribución de probabilidad de los datos, no hubiesen resultado prácticos hace 30 o más años. Como ya se ha mencionado, para calcular un único valor del coeficiente de correlación se requieren cinco minutos de trabajo con una calculadora de sobremesa; para determinar una distribución "bootstrap" de frecuencias que sea razonablemente precisa se precisan de 50 a 1000 de tales cálculos.

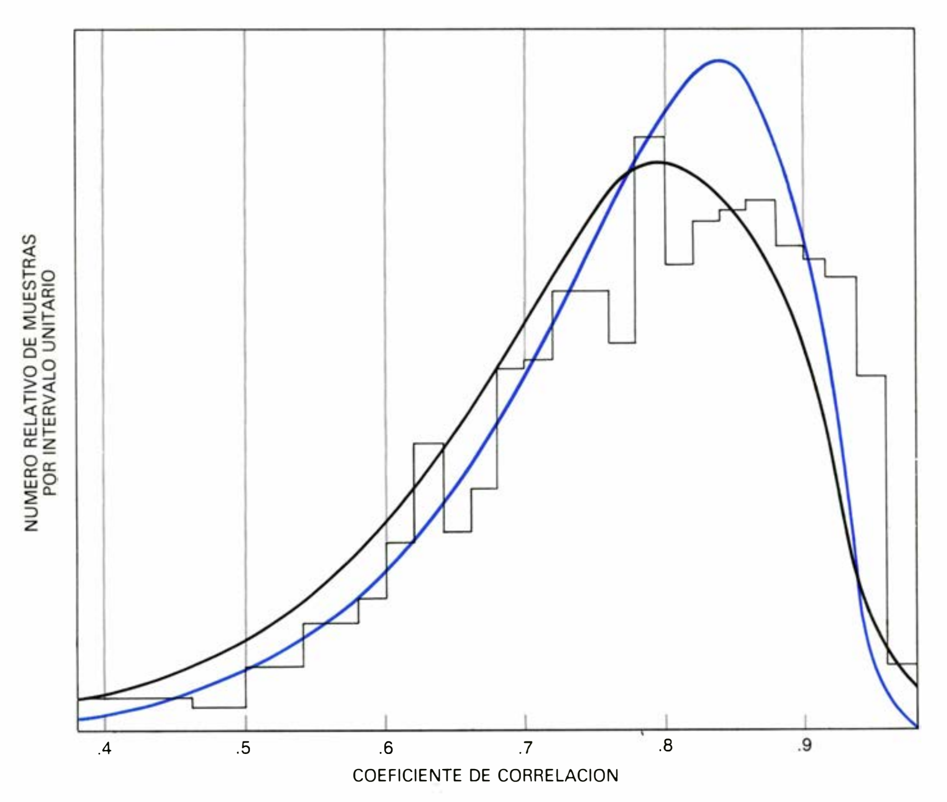
En la actualidad, el cálculo de un solo valor de *r* requiere alrededor de una diezmilésima de segundo en un ordenador de mediana potencia; a tales velocidades, el método de autodocimasia resulta aplicable ya como rutina. Si se generasen 1000 muestras por autodocimasia, la totalidad de los cálculos necesarios para estimar la amplitud del intervalo que contiene al 68 por ciento de las muestras exige menos de un segundo, y no llega a costar un dólar. La estimación de costo se basa en la ejecución de 100.000 operaciones aritméticas. Análisis autodocimantes más ambiciosos, que dan información más precisa acerca de la exactitud del valor calculado para *r*, pueden requerir un millón de operaciones aritméticas.



7. PRECISION ESTADISTICA del valor observado de *r* para una muestra aleatoria; dicha exactitud sólo puede saberse con confianza si se conoce de qué manera varía *r* para un número grande de muestras. Las 15 facultades de derecho para las cuales se ha calculado el valor de *r* se seleccionaron al azar de entre la población total de las 82 facultades de leyes norteamericanas. Existen 82^{15} formas de elegir muestras de 15 facultades de entre la población total; cuatro de tales muestras se han seleccionado rodeando los puntos con circulitos de color. (Es posible seleccionar más de una vez una misma facultad en una muestra dada; tales facultades han sido rodeadas más de una vez.) Los valores observados de *r* para las muestras *a* y *b* son aproximadamente iguales al valor real del coeficiente de correlación del colectivo de las 82 facultades. Sin embargo, el valor de *r* de la muestra *c* es demasiado alto; el valor correspondiente a la muestra *d*, excesivamente bajo. La variabilidad real del valor de *r* para las muestras de 15 facultades puede ser calculada determinando el valor correspondiente a muchas de tales muestras, porque se dispone de datos para muchas otras facultades, además de las 15 anteriores. Con frecuencia, sin embargo, resulta imposible obtener datos adicionales. El método autodocimante, ideado por uno de los autores (Efron), permite estimar el margen de variabilidad correspondiente al total de las muestras basándose en una de ellas.

El método de autodocimasia no vale sólo para analizar magnitudes estadísticas de definición matemática sencilla, como es el caso del coeficiente de correlación. Se ha aplicado en muchos problemas para los cuales la variabilidad de un estadístico no puede expresarse analíticamente. Fijémonos en la familia de estadísticos llamados "componentes principales", que fueron introducidos en 1933 por Harold Hotelling, de la Universidad de Columbia. Los "componentes principales" se idearon para resolver problemas como el siguiente, que viene propuesto en un libro de texto escrito por Kantilal V. Mardia y John T. Kent, de la Universidad de Leeds, y John M. Bibby, de la Universidad a Distancia.

Se somete a 88 estudiantes universitarios a dos exámenes, que deben res-



8. DISTRIBUCION AUTODOCIMANTE del coeficiente de correlación (*perfil "urbano", en línea negra*): se aproxima de cerca a la verdadera distribución de *r* (*curva lisa en negro*). Para representar la verdadera distribución se tomaron al azar un millón de muestras de tamaño 15 de entre las 82^{15} muestras con repetición del mismo tipo que podemos seleccionar de entre las 82 facultades de derecho; las diferencias entre la distribución aquí representada gráficamente y la que en teoría podría dibujarse para la totalidad de las 82^{15} muestras no son discernibles. La forma de la distribución "autodocimante" se aproxima también a la forma de la distribución que resultaría de suponer que la distribución de probabilidad viene dada por una curva campaniforme (o curva normal; *curva lisa de color*). Semejante concordancia sugiere que el método de autodocimasia puede emplearse por medida de la precisión con la que el coeficiente de correlación de la muestra predice el coeficiente de correlación de la población completa. La concordancia, bastante grande, que presentan las cúspides de ambas distribuciones es un artefacto de la muestra.

ponder sin ayuda de libros, y a otros tres, para los que pueden consultarlos. Supongamos que al objeto de calificar a los examinados se desee hallar a partir de las cinco puntuaciones el promedio ponderado que genere máximas diferencias de calificación entre los estudiantes. (Con el fin de hacer que sean las relaciones entre las puntuaciones, y no meramente sus diferencias, las que muestren la más amplia variación posible, se calibrará los coeficientes de ponderación de modo que la suma de sus cuadrados sea igual a 1.) Se obtiene uno de estos sistemas de coeficientes, que por brevedad llamaremos "pesos", tomando exclusivamente las puntuaciones del último examen; los pesos asignados a las cinco calificaciones serían entonces 0, 0, 0, 0, y 1. Empero, si todos los estudiantes hubiesen obtenido en este último examen calificaciones altas, la puntuación global engendrada por este sistema de ponderación no discriminaría eficazmente a los examinados. Obtendremos otro sistema de puntuación global concediendo la misma importancia a todas las pruebas; los pesos serían todos iguales a $1/\sqrt{5}$, es decir, alrededor de 0,45. El sistema de coeficientes de ponderación que genere las máximas diferencias entre los estudiantes se llama primer componente principal.

Es imposible describir en forma matemáticamente cerrada el primer componente principal; hemos de computarlo numéricamente. Cuando se hace el cálculo correspondiente a los 88 estudiantes, resulta que los pesos del primer componente principal son sensiblemente iguales. Por tanto, la máxima discriminación entre los estudiantes está determinada –aproximadamente– por el promedio de sus calificaciones en las cinco pruebas.

El segundo componente principal es el sistema de pesos, sometidos a una condición matemática de independencia, que define para los estudiantes diferencias inmediatamente menores a las máximas. Al calcular el segundo componente principal para este conjunto de 88, los coeficientes de ponderación ofrecen la diferencia entre una media de las pruebas con libros y de las pruebas sin libros. Los componentes principales sugieren así interpretaciones útiles e inesperadas de los promedios de puntuaciones de los alumnos.

¿Hasta qué punto son de fiar tales interpretaciones? Si hemos de confiar en ellas deberíamos tratar de determinar cuánta variación se produce en los valores de los dos componentes principales para muestras de 88 alumnos tomados al azar.

El problema de cuantificar la variabilidad de los componentes principales para muestras de tamaño dado ha preocupado a los especialistas desde hace 50 años. Admitiendo una distribución normal idónea, pueden darse soluciones parciales a cuestiones relativas a la distribución de frecuencias del primer componente principal; poco se conoce, empero, acerca del segundo componente o los de orden superior. Gracias al método de autodocimasia se logra, con ayuda de ordenador, una estimación de la variabilidad de cualquier componente principal sin necesidad de suponer que los datos tengan distribución normal.

En principio, el análisis "bootstrap" se lleva a cabo exactamente como se hace para el coeficiente de correlación. Las series de cinco calificaciones de los estudiantes se copian muchas veces (en una misma hoja cada serie; series distintas en hojas distintas) y después las copias se entremezclan y barajan concienzudamente. Se extrae al azar una nueva muestra de tamaño 88 y se calculan para ella las componentes principales. Este muestreo se repite muchas veces; finalmente se hace una distribución de frecuencias de cada componente principal.

Los resultados así obtenidos inducen a pensar que los pesos asociados con el primer componente principal son muy estables, pues tan sólo varían sus segundas cifras decimales. Los pesos correspondientes al segundo componente principal son menos estables, pero su variación es estructurada. Recordemos que el segundo componente principal se interpretó como la diferencia entre un promedio de las calificaciones de pruebas con libros y las de pruebas sin ellos. Tal interpretación queda reforzada por el análisis autodocimante, pero los pesos atribuidos a los exámenes donde se permite consultar libros son bastante variables. La distribución de las componentes principales, generada por el método de autodocimasia, constituye una buena estimación de la verdadera distribución de las componentes principales para muestras de tamaño 88. A un ordenador grande le basta con un par de segundos para llevar a cabo 100 repeticiones autodocimantes.

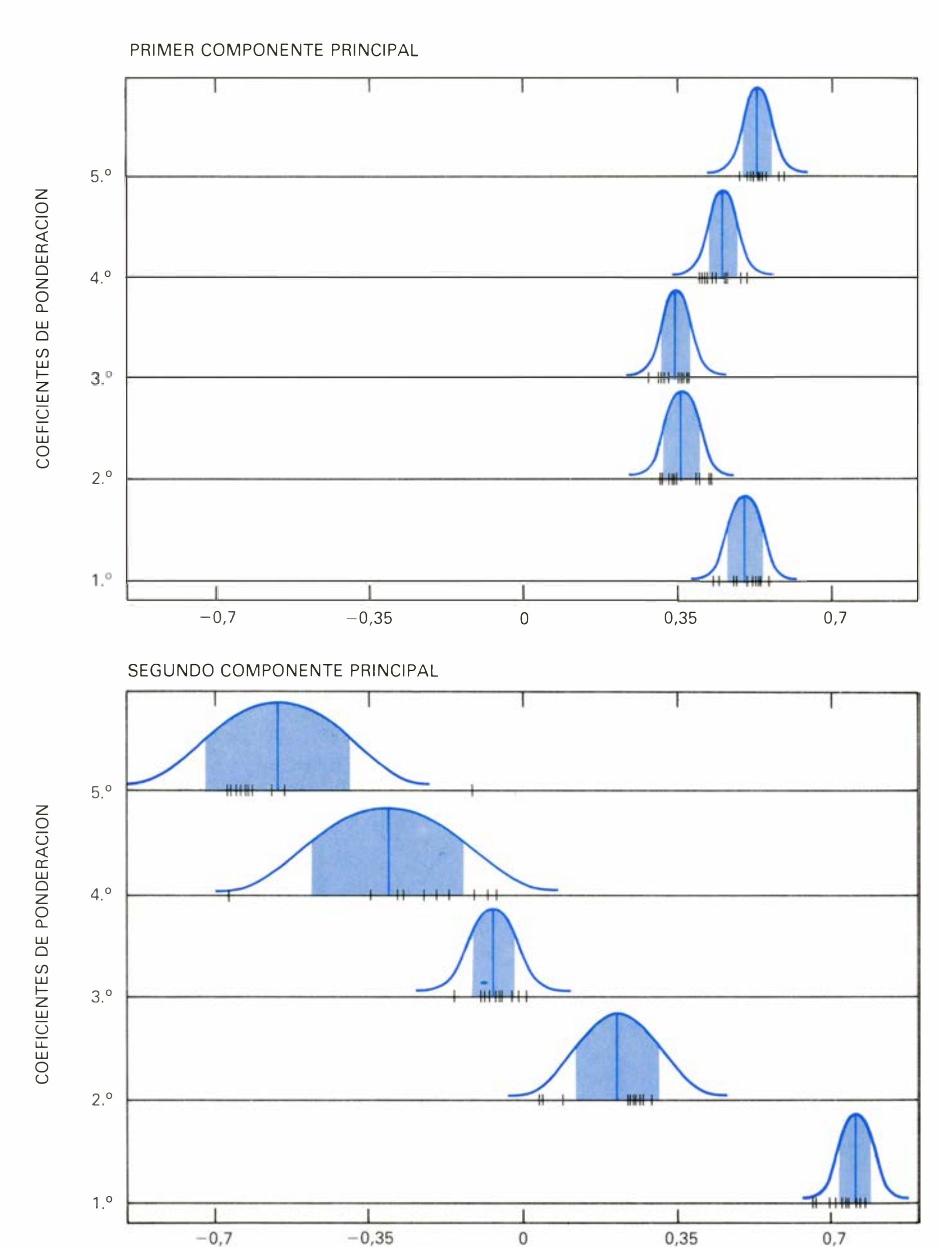
No todos los estimadores estadísticos son numéricos. Desde septiembre de

1978 hasta agosto de 1980, nueve estaciones meteorológicas situadas en el este y medio-oeste de los Estados Unidos estuvieron registrando el *p*H –lo que podríamos llamar "grado de acidez"– de todas las precipitaciones pluviales. (Los valores de *p*H inferiores a 7 corresponden a medios ácidos. Cuanto menor el *p*H, mayor es la acidez.) Durante estos dos años se midieron 2000 valores de *p*H. Para representar los datos, Barry P. Eynon y Paul Switzer, ambos de Stanford, prepararon un mapa de líneas iso-*p*H-métricas (que en lo sucesivo llamaremos "isolíneas"), en las cuales *p*H tiene un valor constante. Para generar tales mapas existe un método matemáticamente bien definido llamado método de Krige, en honor de H. G. Krige, ingeniero de minas sudafricano. Aunque las isolíneas del mapa están estrictamente determinadas por los datos, es preciso para dibujarlas extrapolar los datos recogidos en las nueve estaciones a muchos otros puntos del espacio y del tiempo (a un número infinito, estrictamente hablando), que no forman parte de la muestra original. Podemos lícitamente preguntarnos hasta qué punto serían perturbadas las isolíneas del mapa por fluctuaciones aleatorias en la muestra de 2000 valores de *p*H.

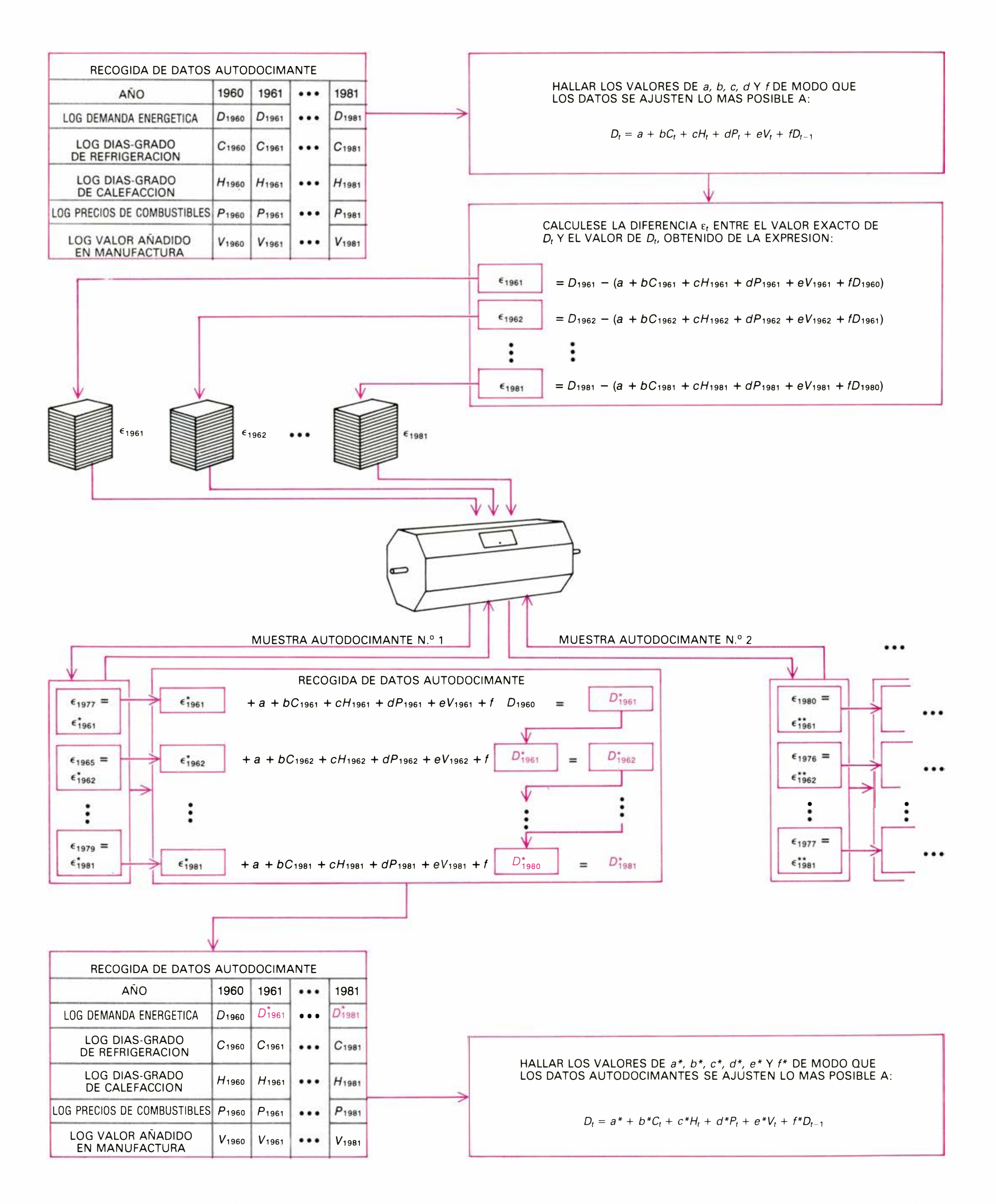
Es imposible en este ejemplo conocer ni las verdaderas isolíneas del mapa ni la verdadera variabilidad de todas las isolíneas generadas por muestras de 2000 valores del *p*H. Ambas estimaciones han de hacerse exclusivamente a partir de los datos originales, si es que de alguna forma han de hacerse. Por autodocimasia de la muestra original de 2000 valores de *p*H, ajustada de manera que se respetasen las relaciones geográficas entre las estaciones meteorológicas, Eynon y Switzer generaron los mapas que se ven en la figura 1. No existe una medida universalmente aceptada de la variabilidad de las isolíneas de un mapa que cumpla papel análogo al de la amplitud de un intervalo en una distribución de frecuencia. Tal variabilidad, por otra parte, se aprecia muy bien intuitivamente, y muestra que el mapa de isolíneas primitivo debe ser interpretado con cierta precaución. Pasillos de acidez relativamente alta o relativamente baja pueden contraerse y convertirse en islas de mapas autodocimantes a consecuencia de los efectos del "ruido" aleatorio.

Es frecuente que la estimación estadística se lleve a cabo haciendo que los datos disponibles se conformen cuan cerca sea posible a un modelo o forma determinada de antemano. Los modelos más sencillos son rectilíneos, planos o análogos de planos en dimensión superior a tres. Fijémonos en el gráfico de los 15 puntos-dato representantes de las 15 facultades de derecho. Vemos, intuitivamente, que hay muchas rectas posibles para representar la tendencia al agrupamiento de la nube de 15 puntos correspondientes a las facultades; por tanto, es conveniente acordar de antemano un método preciso para ajustar los puntos a una recta. Seguramente el estimador más ampliamente utilizado en estadística sea el método de ajuste llamado "de mínimos cuadrados". Este método fue ideado por Gauss y Joseph Louis Lagrange, a principios del siglo pasado, con la finalidad de hacer predicciones astronómicas.

La recta de regresión mínimo-



9. LLAMAMOS COMPONENTES PRINCIPALES a los estimadores estadísticos ampliamente utilizados para calcular calificaciones que resuman las puntuaciones de pruebas de examen bien tipificadas. Supongamos que 88 estudiantes efectúen cada uno cinco de tales exámenes, y que para asignarles una calificación que sintetice las puntuaciones parciales se desee calcular cuál de los promedios ponderados de estas cinco notas genera máximas diferencias de calificación entre ellos. El primer componente principal es el sistema de coeficientes que resuelve este problema. El segundo componente principal es el conjunto de ponderaciones, sujetas a la condición de independencia matemática, que genera la segunda de las combinaciones de notas por orden de mayor a menor discriminación. Al objeto de evaluar la variabilidad de los componentes principales para otras muchas muestras de 88 estudiantes, se aplicó el método de autodocimasia a la única muestra disponible. Las cinco puntuaciones que obtuvo cada estudiante se anotaron en un papel, y cada una de estas series de puntuaciones, copiada muchas veces. Todas las copias fueron seguidamente barajadas concienzudamente; de ellas se extrajeron al azar muestras para autodocimasia de tamaño 88. Se calcularon después las componentes principales de cada una de las muestras "bootstrap". La variación de los pesos de las primeras 10 muestras está destacada por las marcas negras de cada gráfico; las líneas verticales rojas indican los valores observados de los coeficientes de ponderación. La anchura de la banda central situada bajo las pequeñas curvas acampanadas expresa la variabilidad de la ponderación. Los pesos cuarto y quinto del segundo componente principal son muy inestables.



10. MODELO DE DEMANDA ENERGETICA, llamado RDFOR (Regional Demand Forecasting Model), utilizado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos para analizar y pronosticar las demandas de energía en 10 regiones norteamericanas. Los datos correspondientes a cada región se ajustan lo más estrechamente posible a un modelo matemático llamado ecuación de regresión. Se supone que la demanda energética correspondiente a un año depende de la demanda de energía del año anterior, así como de varias otras magnitudes. Cada término de error ε_t expresa la diferencia entre el valor pronosticado de la demanda energética para un año dado y el valor realmente observado. Se seleccionan al azar muestras para autodocimasia de los términos de error y se generan datos artificiales para la demanda energética mediante el procedimiento que se muestra en el diagrama. Los datos artificiales así obtenidos se ajustan a una nueva ecuación de regresión, y la variabilidad de las ecuaciones de regresión generadas por el método de autodocimasia permite estimar la exactitud esperable del modelo. Un análisis por autodocimasia llevado a cabo por David A. Freedman, de la Universidad de Berkeley, y Stephen C. Peters, de Stanford, ha puesto de manifiesto que la variabilidad de estas ecuaciones es de dos a tres veces mayor de lo hasta ahora pensado.

cuadrática es la recta que hace mínima la suma de los cuadrados de las distancias verticales entre los puntos-dato y la recta. Un cálculo sencillo da la ecuación de tal recta a partir de las coordenadas de los datos. Al aplicar a los datos el método de autodocimasia, se generan nubes "simuladas" de puntos-dato, a cada uno de las cuales podemos aplicar el método de mínimos cuadrados, y determinar así una nueva recta de regresión. La fluctuación de las rectas generadas por el método autodocimante muestra la variabilidad del método de mínimos cuadrados como estimador estadístico para este conjunto de puntos-dato.

El método de mínimos cuadrados y sus generalizaciones resultan de particular utilidad en problemas complejos donde los investigadores deban aplicar a la solución de una única pregunta gran cantidad de informaciones diversas y heterogéneas. Así, por ejemplo, el Departamento de Energía de los Estados Unidos ha puesto a punto un modelo llamado Previsión de Demanda Energética Regional ("Regional Demand Forecast Model", RDFOR), que se propone prever las demandas de energía de diez regiones estadounidenses. Se supone en tal modelo que la demanda energética de cada región es función sencilla de cinco variables: las elevaciones veraniegas de la temperatura por encima de los 24 grados Celsius y los descensos invernales por debajo de los 18 grados; el precio de los combustibles; el valor añadido por fabricación (que da una medida de las condiciones económicas de la zona) y las demandas de energía del año anterior.

	PACIENTE NUMERO:						
	149	150	151	152	153	154	155
EDAD	20	36	46	44	61	53	43
SEXO	M	M	M	M	M	F	M
¿DETECTADOS ESTEROIDES?	SI	NO	NO	NO	SI	SI	NO
¿SE HAN ADMINISTRADO ANTIVIRALES?	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
¿HAY FATIGA?	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI
¿SUFRE DOLOR?	NO	NO	SI	NO	SI	NO	NO
¿SUFRE ANOREXIA?	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO
¿HIGADO HIPERTROFICO?	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO
¿HIGADO FIRME?	*	NO	NO	SI	SI	NO	NO
¿ES PALPABLE EL BAZO?	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI
¿PRESENTA ICTERICIA?	NO	NO	SI	NO	SI	SI	SI
¿PRESENTA ASCITIS?	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI
¿PRESENTA VARICES?	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO
CONCENTRACION DE BILIRRUBINA	0,9	0,6	7,6	0,9	0,8	1,5	1,2
CONCENTRACION DE FOSFATASA ALCALINA	89	120	*	126	95	84	100
CONCENTRACION DE SERO-TRANSAMINASA GLUTAMICO-OXALACETICA	152	30	242	142	20	19	19
CONCENTRACION DE ALBUMINA	4,0	4,0	3,3	4,3	4,1	4,1	3,1
CONCENTRACION DE PROTIDOS	*	*	50	*	*	48	42
PROGNOSIS MEDICA	VIVIR	VIVIR	*	VIVIR	VIVIR	*	VIVIR
RESULTADO	VIVIR	VIVIR	MUERTE	VIVIR	VIVIR	VIVIR	MUERTE

11. DATOS CLINICOS de siete pacientes tomados al azar de entre un total de 155 personas enfermas de hepatitis (aguda o crónica); nos muestran los valores de 19 variables para cada paciente que, tomadas conjuntamente, pudieran pronosticar si fallecerá a causa de la enfermedad o si llegará a recobrarse de ella. (Los asteriscos indican la carencia de ese dato.) Es habitual en el trabajo estadístico llevar a cabo una inspección preliminar de los datos antes de construir un modelo formal; la inspección pretende aquí descartar casi todas las variables a excepción de las cuatro o cinco más importantes. Peter B. Gregory, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, eliminó todas las variables a excepción de los dolores sufridos por el paciente, la ascitis (presencia de líquido en la cavidad abdominal), la concentración de bilirrubina y la prognosis emitida por el médico que atiende al enfermo. Gregory puso a punto un modelo que predijo correctamente la supervivencia o deceso del paciente en el 84 por ciento de los casos.

Podemos imaginar estas cinco variables como otras tantas coordenadas de puntos representados en un espacio pentadimensional; el "gráfico" que formarían sería estrictamente análogo a uno bidimensional. Cada punto del gráfico pentadimensional se corresponde biunívocamente con una combinación de las cinco variables. La demanda energética de un año dado, asociado con una combinación conocida de variables, puede entonces ser representada por la altura de un punto del espacio hexadimensional situado sobre la región pentadimensional. La representación de datos en un espacio hexadimensional es análoga a la representación de la dependencia de cierta magnitud con respecto a otras dos variables en forma de alturas de puntos del espacio tridimensional sobre un gráfico bidimensional. Así pues, los datos de carácter energético determinan un conjunto de puntos situados a diversas alturas en el espacio hexadimensional.

El método de mínimos cuadrados especifica un procedimiento para trazar el análogo pentadimensional de un plano (llamado hiperplano) que se ciña lo más posible a todos los puntos. A causa de la dependencia de la demanda de energía de cada año con respecto a la demanda de años anteriores, el ajuste de las variables al hiperplano tiene que hacerse mediante una versión generalizada del método de mínimos cuadrados. El método generalizado requiere hacer mínima una suma ponderada de errores una vez estimados los coeficientes de ponderación a partir de los datos. En estos últimos años se ha puesto a punto un complicado método para estimar la precisión del procedimiento y la exactitud de las predicciones.

Freedman y Stephen C. Peters, de Stanford, examinaron las estimaciones convencionales de la precisión del procedimiento por medio del método de autodocimasia. En su análisis, se supone que los datos se encuentran cercanos a un hiperplano idóneo, pero no se supone que los errores entre los puntos-dato y los puntos asociados con ellos en el hiperplano sean independientes entre sí. Se permite, en cambio, que la relación de los errores de un punto a otro tenga una estructura

compleja. La autodocimasia de los datos se llevó a cabo de manera que preservase la evolución anual de la demanda de energía. La variabilidad de los hiperplanos engendrados por autodocimasia puso de manifiesto que el error típico comúnmente admitido para el modelo energético era de dos a tres veces demasiado pequeño. Las predicciones sobre demanda energética obtenidas por este procedimiento son, por consiguiente, mucho menos de fiar de lo que pudo pensarse.

Los ejemplos que hasta ahora hemos presentado se han referido todos ellos a propiedades estadísticas de las muestras que están claramente definidas. En la práctica, es muy posible que los datos sean inspeccionados, clasificados, representados gráficamente y sometidos a diversos análisis preliminares antes de proceder a analizarlos formalmente. Las estimaciones de la variabilidad que pasen por alto estas manipulaciones previas no recojan una imagen precisa de la variabilidad estadística.

Fijémonos en un grupo de 115 pacientes de hepatitis (en sus formas aguda y crónica) que fue inicialmente estudiado por Peter B. Gregory, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford. De estos 155 pacientes, 33 fallecieron y 122 sobrevivieron. Para cada paciente se disponía de datos correspondientes a 19 variables, tales como edad, sexo y las constantes bioquímicas habituales. El objetivo de Gregory era descubrir si podría construirse, a partir de tales datos, un modelo capaz de predecir las posibilidades de supervivencia de cada paciente.

El análisis de los datos se realizó en varias etapas. Se comenzó por dejar sólo cuatro de las variables más importantes; la experiencia estadística indica que no es prudente construir un modelo fundado en 19 variables cuando sólo se dispone de 155 puntos-dato. La eliminación de variables se efectuó en dos pasos: cada variable se inspeccionó individualmente; de cuyo examen resultaron eliminadas seis variables que, al parecer, no guardaban relación con la supervivencia de los pacientes. A continuación, las trece variables restantes se sometieron a técnicas estadísticas estándar, reduciendo su número más todavía, hasta dejarlas en cuatro. Las variables que subsistieron fueron: las molestias sufridas por el paciente, la ascitis (presencia de fluidos en el abdomen), la concentración de bilirrubina en el hígado y la prognosis emitida por el médico del paciente. A estas variables se les ajustó una curva que predice en qué medida depende la proporción de enfermos supervivientes de los valores de esos datos.

Análisis de este tipo son los que se acostumbra a manejar en la investigación científica. A fin de estimar su variabilidad total, Gail Gong, de la Universidad Carnegie-Mellon, repitió el procedimiento, desde la supresión inicial hasta el ajuste final de la curva, para muestras autodocimantes de los 155 puntos-dato originales. Los resultados que Gong obtuvo fueron tan sorprendentes como ilustrativos. El conjunto de variables "importantes" que se generaba en las etapas iniciales del análisis resultaba francamente errático. Para algunas de las muestras autodocimantes, sólo importaba la prognosis del médico; para otras muestras se creyó oportuno ponderar el sexo, el grado de fatiga, la edad, la concentración de albúmina o la concentración de prótidos. En nada menos que el 60 por ciento de las muestras no llegó a destacar como significativa ni una sola de las variables consideradas.

Aunque la curva ajustada a los datos se ideó para predecir si el paciente sobreviviría o no, el 16 por ciento de los 155 individuos de la muestra quedaron indebidamente clasificados. La estimación del 16 por ciento es, empero, demasiado pequeña, porque los datos en que se funda fueron también los utilizados para construir la curva. El análisis generado por autodocimasia sugiere que una estimación mejor de la probabilidad de clasificación incorrecta al utilizar la curva en un paciente dado estaría en torno a 0,20.

La perspectiva de autodocimar el proceso completo de análisis de los datos ofrece ciertas esperanzas de que comience a ceder un problema extraordinariamente difícil, a saber, el de la conexión entre teoría matemática subyacente a la estadística y ejercicio real de la estadística en las aplicaciones prácticas. Por lo común se dejan de lado los efectos que sobre los resultados finales tiene el "meter la nariz en los datos", y ello, por la razón de que es prácticamente imposible analizar matemáticamente tales efectos. Parece ahora que la autodocimasia, aplicada con ayuda de ordenador, puede empezar a valorarlos.

El autodocimante no es en absoluto el único método estadístico que se funda en la potencia de los ordenadores. Otros métodos, como los llamados "jackknife" (navaja), validación recíproca, o el conocido por replicación repetida equilibrada, están animados de igual espíritu que el autodocimante, si bien son muy diferentes a nivel de detalle. Cada procedimiento de esos genera datos ficticios a partir de los datos originales; y calcula luego la variabilidad real de un estadístico a partir de su variabilidad sobre los conjuntos de datos ficticios. Las diferencias de tales métodos respecto del método "bootstrap" y los demás residen en los procedimientos seguidos para engendrar tales datos ficticios.

El más antiguo de estos métodos fue el "jackknife", inventado en 1949 por

MUESTRA AUTODOCIMANTE NUMERO	VARIABLES ELEGIDAS
491	ALBUMINA, PROGNOSIS, SEXO
492	ASCITIS; BILIRRUBINA, PROGNOSIS
493	BILIRRUBINA, ASCITIS
494	BILIRRUBINA, PROGNOSIS; DOLORES
495	ASCITIS
496	BILIRRUBINA
497	ASCITIS, VARICES
498	ICTERICIA, PROGNOSIS, ALBUMINA
499	EDAD, PROGNOSIS, BILIRRUBINA, DOLORES; PROTIDOS, ICTERICIA
500	ASCITIS; PROGNOSIS, BILIRRUBINA, PROTIDOS

12. VARIABLES SEÑALADAS como importantes tras un análisis informal previo a la construcción de un modelo estadístico formal; llegan a presentar una amplia oscilación. En un estudio por autodocimasia, donde se simularon los aspectos formales e informales del análisis estadístico, Gail Gong, de la Carnegie-Mellon University, programó un ordenador para que copiase muchas veces la serie de 19 variables asociada con cada paciente. Tras barajar a fondo las series de datos, se extrajeron al azar de esta gran colección 155 muestras para autodocimasia. Seguidamente, se aplicaron a estas muestras métodos formales e informales de análisis de los datos, al igual que se hizo para la muestra original. La tabla presenta las variables consideradas importantes en 10 de las 500 muestras de autodocimasia generadas. De las cuatro variables inicialmente elegidas como fundamentales, ni siquiera una de ellas alcanzó a ser elegida en el 60 por ciento de las muestras. No debe tomarse, pues, en serio las variables seleccionadas en el primer análisis.

Maurice Quenouille, y puesto a punto en 1950 por John W. Tukey, de la Universidad de Princeton y los Laboratorios Bell; lo investigaron, in extenso, Colin L. Mallows, de los Laboratorios Bell, Louis Jaeckel, de Berkeley, David V. Hinkley, de la Universidad de Texas en Austin, Rupert G. Miller, de Stanford, William R. Schucany, de la Southern Methodist University, y por otros muchos. El nombre "jackknife" fue acuñado por Tukey, con la intención de sugerir que el método es un instrumento estadístico de utilidad general, como la navaja.

El método "navaja" consiste en ir suprimiendo, cada vez, una observación del conjunto inicial de datos, y recalcular el estadístico que nos interese para uno de los conjuntos de datos así truncados. Podemos entonces describir la variabilidad del estadístico a través de todos los conjuntos truncados de datos. Para los datos correspondientes a las 15 facultades de derecho, el método "navaja" evalúa la precisión estadística del valor de r, haciendo 15 veces el cálculo del valor de r, una para cada una de las 15 posibles submuestras de tamaño 14. El método "navaja" requiere muchos menos cálculos que el autodocimante; en cambio, parece ser menos versátil y en ocasiones, menos fiable.

El método de validación recíproca es desarrollo y refinamiento de una idea sencilla. Los datos se escinden en dos grupos; de éstos, el segundo es dejado aparte. Se ajustan entonces curvas a la primera mitad, curvas que luego van ensayándose una por una para ver cuál de ellas se ajusta mejor a la segunda. La verificación final es la validación recíproca, que da una indicación fiable de lo bien que la curva ajustada permitiría predecir los valores de los nuevos datos. La división en partes iguales no tiene nada de sacrosanta; los datos podrían igualmente escindirse en la proporción de 90 a 10. No hay, por otra parte, razón alguna para efectuar solamente una vez la validación recíproca; es lícito escindir muchas veces los datos y hacerlo de distintas formas.

La validación recíproca se ha utilizado extensamente en situaciones donde el procedimiento de ajuste de una curva está bien definido, a excepción de un único aspecto crucial. Supongamos, por ejemplo, que estuviéramos decididos a ajustar, por el método de mínimos cuadrados, un polinomio a los datos, pero que nos invada todavía la duda acerca del grado del polimonio a ajustar. (Cuanto mayor sea el grado, tanto menos lisa será la curva ajustada.) Una vez aproximada la mitad de los datos por polinomios de diversos grados, el método de validación recíproca servirá para elegir el grado del polinomio que mejor se ajuste a la segunda mitad de los datos. Seymour Geisser, de Minnesota, M. Stone, de Londres, y G. G. Wahba, de Wisconsin, han sido pioneros en este campo.

En lugar de escindir los datos al azar en dos mitades pueden utilizarse procedimientos de división más sistemáticos. Es posible elegir las particiones de modo que los resultados sean óptimos para ciertas situaciones sencillas que consienten un análisis teórico completo. El método de replicación repetida y equilibrada, desarrollado por Philip J. McCarthy, de la Universidad de Cornell, efectúa particiones sistemáticas de los datos, a fin de evaluar la variabilidad de encuestas y de muestras del censo. El submuestreo aleatorio, que es un método afín preparado por John A. Hartigan, de la Universidad de Yale, ha sido diseñado para obtener intervalos de confianza dignos de crédito en ciertas situaciones.

Subyace a los distintos métodos una íntima conexión teórica. Una misma concepción los desarrolla a todos ellos, así como a varios otros, a partir del "bootstrap". Es forzoso, por tanto, preguntar qué garantía se tiene de que el método autodocimante funcione en casi todos los casos y hasta qué punto pueda generalizarse. La primera de estas preguntas tiene respuesta sencilla. Nuestro método se ha ensayado en gran número de problemas, así el de las facultades de derecho, donde se conoce la respuesta exacta. Las estimaciones que proporciona son en este tipo de problemas suficientemente buenas, y puede demostrarse matemáticamente que el método funcionará igualmente bien en problemas similares.

Hemos sugerido una respuesta a la segunda cuestión a través de la diversidad de problemas a los cuales se ha aplicado ya el método autodocimante. Lo que en muchos de ellos se requiere, sin embargo, es una justificación teórica independiente de que la estimación autodocimante de la precisión estadística sigue siendo tan válida como lo era en problemas más sencillos. Los trabajos teóricos en curso buscan proporcionar tal justificación y dar enunciados más precisos de la exactitud estadística basados en el "bootstrap". Fisher supo proporcionar una teoría estadística que sacase partido pleno de los procedimientos de cómputo disponibles entre 1920 y 1930. El objetivo es ahora hacer otro tanto para nuestro decenio.

Simbiosis *Rhizobium*-leguminosa

El incremento en la demanda de alimentos y precio de fertilizantes nitrogenados ha estimulado las investigaciones sobre esta asociación microbio-planta capaz de integrar el nitrógeno atmosférico en aminoácidos esenciales en la dieta

Concepción Azcón González de Aguilar, José-Miguel Barea y José Olivares

Ciertos microorganismos del suelo forman con algunas plantas superiores asociaciones simbióticas capaces de fijar nitrógeno molecular, N_2, de la atmósfera. Esas asociaciones son mutualísticas; es decir, se benefician ambos componentes. La existencia de tales simbiosis se manifiesta por la presencia de nódulos o tumuraciones en las raíces, que aparecen como respuesta de la planta a la invasión por el microorganismo. Los microorganismos implicados son procariotas pertenecientes a las familias Frankiaceae, Rizobiaceae y a la división Cianobacteria (algas verde-azuladas). Se trata, por tanto, de bacterias en todos los casos.

La capacidad que muestra el actinomiceto *Frankia* para fijar N_2, esto es, para convertirlo en nitrógeno orgánico, sólo se ha observado en nódulos de las raíces de ciertas plantas Angiospermas, no leguminosas. Recientemente, se ha logrado cultivar la bacteria en ausencia del vegetal. Las especies del género *Rhizobium*, por su parte, desarrollan vida autónoma, pero su actividad fijadora de N_2, salvo en ciertas razas, sólo ocurre cuando se establece la simbiosis con plantas leguminosas. Como única excepción se ha descrito *Rhizobium* sp., capaz de formar nódulos con la no-leguminosa *Parasponia*. Está, por último, la cianobacteria *Nostoc (¿Anabaena?)*, que crece y fija N_2 tanto libre como simbióticamente, formando nódulos en raíces de Gimnospermas.

La fijación biológica de nitrógeno es, cuantitativamente, el proceso más importante de todos los implicados en el aporte de nitrógeno al suelo. Mientras que los fertilizantes nitrogenados suministran al suelo anualmente 60 millones de toneladas métricas de N y la fijación química natural representa unos 30 millones, la fijación biológica supone 130 millones de toneladas métricas; de éstas, algo más de la mitad se deben a la simbiosis *Rhizobium*-leguminosa. El resto del nitrógeno fijado biológicamente, si bien importante en cantidad, reviste poca significación agrícola. Se debe en su mayor parte a la acción de microorganismos de vida libre, aerobios o anaerobios, de un escaso rendimiento fijador, aunque bastante abundantes en número. Otras asociaciones simbióticas, como en las que intervienen algas verdes azuladas (cianobacterias), manifiestan cierto interés en los cultivos de arroz y las establecidas entre *Frankia* (un actinomiceto) y angiospermas no leguminosas (*Alnus* y *Casuarina*, entre otras) son de importancia forestal.

La fijación biológica de nitrógeno adquiere cada día mayor interés, habida cuenta de la crisis actual del petróleo, fuente de energía y materia prima para la producción de amoníaco, sin olvidar las implicaciones ecológicas que se derivan del uso intensivo de los fertilizantes nitrogenados.

Por otra parte, el crecimiento de la población determina una mayor necesidad de alimentos, y las costumbres alimentarias exigen una proporción más alta de proteínas en la dieta. Todos estos factores, por sí solos y en conjunto, hacen que el cultivo de leguminosas muestre un interés especial, no sólo en virtud de su alto contenido en proteína, sino también por su relativa independencia de la fertilización nitrogenada al poder fijar nitrógeno atmosférico en simbiosis con *Rhizobium*. Aquí nos vamos a ceñir al estudio de la simbiosis *Rhizobium*-leguminosa por las razones anteriormente expuestas.

En la práctica totalidad de las especies de leguminosas estudiadas (el 10 por ciento de las existentes sobre la tierra) se ha puesto de manifiesto la presencia de nódulos en sus raíces. Las especies de leguminosas que no forman nódulos pertenecen en su mayoría a la subfamilia *Cesalpinoideae*.

Con respecto a su distribución, se puede afirmar, con carácter general, que allí donde hay una leguminosa susceptible se encuentra su *Rhizobium* específico. Más difícil resulta asegurar lo inverso, aunque no suele darse *Rhizobium* en los hábitats donde faltan sus huéspedes.

No existe acuerdo sobre la taxonomía de las especies de *Rhizobium*. Clásicamente, se admite la existencia de seis especies: *R. trifolii, R. leguminosarum, R. phaseoli, R. meliloti, R. lupini* y *R. japonicum*, de acuerdo con las plantas más significativas que éstos pueden infectar. Pero algunos autores han considerado que este criterio no era suficiente para establecer seis especies, por lo que proponen agruparlos en una sola, o a lo más dos, una de rápido crecimiento y otra de lento desarrollo, admitiendo la existencia de variedades adaptadas a los distintos grupos de leguminosas. Hoy día se acepta un tercer grupo, "cowpea", que incluye bacterias de velocidad de crecimiento variable, generalmente de especificidad poco estricta, que infectan leguminosas tropicales mediante una vía distinta a la de las especies tradicionales.

Rhizobium es un microorganismo predominantemente rizosférico, capaz de multiplicarse sobre la superficie de las raíces, tanto de no leguminosas como de leguminosas. Se sabe que las plantas ejercen una acción selectiva sobre los microorganismos que crecen en su rizosfera. En el caso de *Rhizobium*, ocurre que las diferentes especies y razas de esta bacteria reciben una estimulación selectiva: más por sus hospedadores específicos que por los que no lo

1. NODULOS FIJADORES DE NITROGENO: se desarrollan en las raíces de las leguminosas como respuesta de la planta a la infección. Son tumoraciones visibles macroscópicamente, que aparecen en gran número pocos días después de haber estado la raíz en contacto con la bacteria. Las raíces que se muestran en la fotografía adyacente corresponden a *Phaseolus vulgaris* (judía) inoculada con *Rhizobium phaseoli*.



son. Aunque la regla no está libre de frecuentes excepciones. En general, la estimulación se nota más en los sitios donde emergen raíces laterales. Posiblemente, la planta ejerce su influencia selectiva sobre *Rhizobium* mediante el efecto nutricional de sus exudados radicales; no obstante, por la complejidad de éstos y por la variabilidad de las distintas especies de *Rhizobium* en cuanto a sus requerimientos nutritivos, se hace difícil sacar conclusiones definitivas de las causas que determinan tal influencia selectiva. Por si fuera poco, se han encontrado exudados radicales que no influyen en *Rhizobium*, e incluso, algunos que inhiben su crecimiento.

De otro lado, es lógico pensar que los factores ecológicos que inciden en la rizosfera afecten al desarrollo de *Rhizobium*. Se sabe que el *p*H, la salinidad, la temperatura, desecación y fertilizantes químicos condicionan la supervivencia y actividad de estas bacterias. Lo que no obsta para que contemplemos una rica variabilidad en el comportamiento de las razas de *Rhizobium* ante las diferentes circunstancias ambientales.

Muchos microorganismos del suelo afectan también al crecimiento de *Rhizobium*. Algunos de ellos lo estimulan, en tanto que otros lo inhiben. La causa de antagonismo frente a *Rhizobium* más comúnmente descrita es la basada en la producción de antibióticos por otros microorganismos de la rizosfera. Además, se conoce que *Rhizobium* puede ser parasitado por *Bdellovibrio* y bacteriófagos específicos, lisado por mixobacterias y sometido a predación por parte de ciertas amebas del suelo. Sin embargo, al igual que ocurre en otros casos de antagonismo microbiano, estos fenómenos han sido puestos de manifiesto mediante estudios "in vitro" y no se conoce su significado real en el suelo.

La simbiosis *Rhizobium*-leguminosa se establece como resultado de la expresión de unas características propias de la bacteria, de la planta hospedadora o de la asociación de ambas. Estas características, o propiedades simbióticas, reciben los nombres de especificidad, infectividad y efectividad.

Cualquiera que sea el mecanismo de la invasión de las raíces por *Rhizobium*, a través de los pelos radicales o de los espacios intercelulares de la corteza de la raíz, existe un grado de especificidad variable. Ciertas leguminosas tienen unos requerimientos muy concretos para "su" *Rhizobium*, mientras que otras aceptan un espectro extremadamente amplio y, al contrario, un determinado *Rhizobium* puede infectar una sola especie de leguminosa, un grupo de especies o incluso miembros de distintos géneros o subfamilias.

El esquema propuesto por Nutman en 1965, en el que se recogen las interacciones bacteria-raíz que conducen a la infección de los pelos radicales, sigue aceptándose en sus líneas generales, que se comentan a continuación. Evidentemente, el progreso de la investigación ha dado lugar a nuevas informaciones que hay que tratar de acoplar a los esquemas ya establecidos.

Hoy día se conocen y aceptan cómo ocurren la mayoría de dichos procesos, mientras que otros, o sus causas, son aún desconocidos y si algo se sabe de ellos es de modo fragmentario, por lo que para dar explicaciones de estos últimos se han propuesto y discutido varias hipótesis. Seguidamente, se analizan, por separado, cada uno de estos procesos, tanto en sus facetas conocidas como en las hipotéticamente supuestas.

Cuando la infección ocurre a través de los pelos radicales, el primer hecho que se aprecia es la elongación y ramificación de los mismos. El período de susceptibilidad a la infección es corto y transcurre durante la elongación de los pelos. Las infecciones no se presentan al azar, sino que se registran en sitios determinados. La formación de cordones de infección después del período de susceptibilidad puede no dar lugar a la formación de nódulos y, en todo caso, éstos pueden resultar inoperantes para fijar N_2.

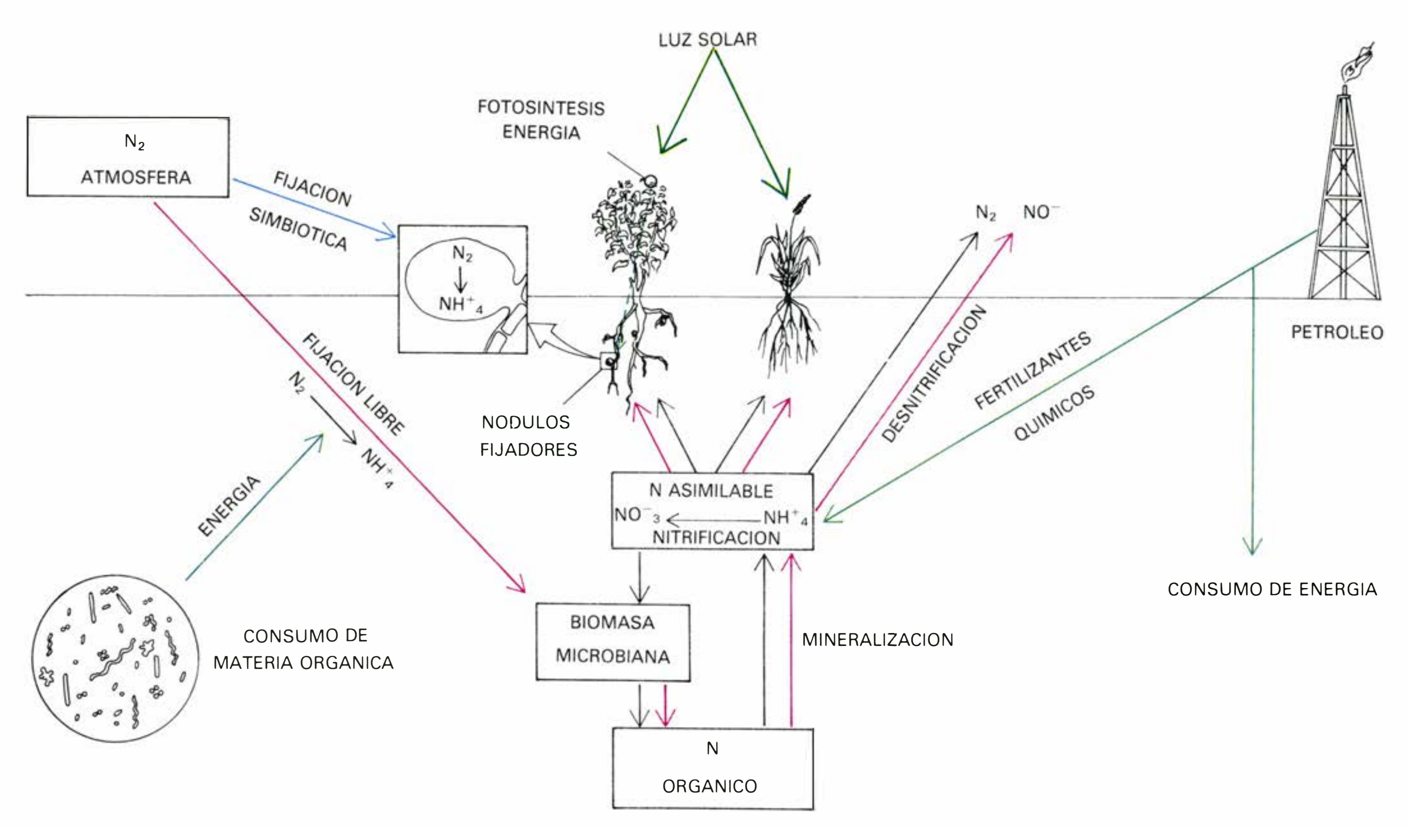
Se comentó antes el efecto de los exudados radicales sobre el crecimiento de *Rhizobium* en la rizosfera, del que se dijo constituía un efecto de estimulación selectiva, aunque no específica. Sin embargo, uno de los autores (Olivares) y sus colaboradores de la Estación Experimental del Zaidín deducen que dicho efecto, no totalmente específico, que va a dar lugar al predominio en la rizosfera de un *Rhizobium* determinado, es consecuencia de una inducción específica de la bacteria sobre la raíz. Demostraron, efectivamente, un incremento en la liberación de triptófano por la raíz de alfalfa cuando se encuentra en presencia de *R. meliloti*, o de sus polisacáridos extracelulares, que parecen afectar la producción del exudado radical.

El triptófano liberado significa un incremento del sustrato que necesitan *Rhizobium* y otros microorganismos de la rizosfera para producir ácido indol acético (AIA). Esta auxina tiene posi-

ESPECIES DE *RHIZOBIUM* Y SUS CARACTERISTICAS

ESPECIE	ZONA SUERO EN LECHE TORNASOLADA	REACCION ACIDA	VELOCIDAD CRECIMIENTO	PLANTA HOSPEDADORA
R. TRIFOLII	+	–	RAPIDA	*TRIFOLIUM* (TREBOL)
R. LEGUMINOSARUM	+	–	RAPIDA	*PISUM* (GUISANTE), *LENS* (LENTEJA), *LATHYRUS* (ALMORTA), *VICIA* (HABA)
R. PHASEOLI	+	–	RAPIDA	*PHASEOULUS* (JUDIA)
R. MELILOTI	+	+	RAPIDA	*MELILOTUS, MEDICAGO* (ALFALFA), *TRIGONELLA*
R. LUPINI	–	–	LENTA	*GLYCINE MAX.* (SOJA)
R. JAPONICUM	–	–	LENTA	*LUPINUS* (ALTRAMUZ), *ORNITHOPUS*
R. COWPEA	VARIABLE	VARIABLE	VARIABLE	*VIGNA, DESMODIUM, ARACHIS* (CACAHUETE), ETC.

2. TRADICIONALMENTE SE HAN VENIDO reconociendo seis especies del género *Rhizobium*, diferenciadas principalmente por la leguminosa o grupo de leguminosas que eran capaces de infectar, y con la que podían establecer una asociación simbiótica íntima. Esta característica, llamada especificidad, ha dado lugar a los llamados grupos de inoculación cruzada y se manifiesta de forma más o menos estricta. Aunque durante estos últimos años ha tomado base la hipótesis desarrollada sobre el papel que pueden desempeñar las lectinas de la raíz y los lipopolisacáridos de la bacteria, no hay todavía elementos de juicio suficientes para establecer la verdadera causa de esta propiedad simbiótica. Otros criterios taxonómicos son de valor relativo. Recientemente, todas las bacterias con comportamiento variable, de especificidad laxa y aisladas de leguminosas tropicales, se han reunido dentro del grupo "cowpea".



3. A TRAVES DE LA FIJACION BIOLOGICA llega a la Tierra cuatro veces más nitrógeno que por los fertilizantes químicos, productos comerciales de elevado precio y contaminantes, a la larga, de los ecosistemas. La mitad del nitrógeno fijado biológicamente lo suministra la simbiosis *Rhizobium*-leguminosa mediante un proceso en el que la energía consumida procede del sol (fotosíntesis). De otra parte, para que el N_2 captado por fijadores libres pueda ser utilizado por las plantas ha de tener lugar una secuencia de acontecimientos (lisis celular, amonificación, etcétera), en la que intervienen grupos de microorganismos especializados. En el transcurso de tales transformaciones ocurren pérdidas de nitrógeno asimilable por inmovilización, fijación a coloides del suelo o desnitrificación, según se indica (*líneas rojas*). En la fijación simbiótica el nitrógeno es utilizable por el vegetal (*línea azul*).

blemente un papel múltiple en el proceso de infección, ya que se ha sugerido su participación en la formación, desarrollo y curvatura de los pelos radicales. Los enzimas hidrolíticos de la pared celular intervienen de una manera destacada en el proceso de infección; en particular, las pectinasas producidas por la bacteria inducen una relajación de la pared celular permitiendo la penetración de las bacterias en el interior de los pelos radicales.

Establecidos en las rizosferas de una leguminosa, ciertos *Rhizobia* se unen a la superficie de la raíz, tanto a los pelos radicales como a las células epidérmicas. La unión ocurre siempre con el eje más largo de la bacteria perpendicular a la rizoplana y sólo se manifiesta entre un *Rhizobium* y su leguminosa apropiada.

Se ha sugerido que estas bacterias podrían unirse a las raíces a través de las lectinas (fitohemaglutininas) situadas en el "sitio" de unión polar. Si efectivamente las lectinas (glucoproteínas) son mediadoras en el proceso de unión de *Rhizobium* a la raíz, ejerciendo una función de puente, es un tema sometido hoy a debate. Una hipótesis bastante atractiva sugiere que estas glucoproteínas son las responsables directas del control de la especificidad en la asociación *Rhizobium*-leguminosa. Varios autores defienden que las lectinas interactúan específicamente con determinados lipopolisacáridos de la superficie de las células del *Rhizobium* apropiado. Estos receptores parecen estar presentes en la superficie de *Rhizobium* sólo en ciertos momentos del desarrollo del cultivo de la bacteria.

Las lectinas, de naturaleza glucoproteica, son tetrámeros con subunidades que pueden ser idénticas (lectina de tipo I), iguales dos a dos (tipo II) o incluso todas diferentes (tipo III) y pueden poseer 0, 1, 2 o 4 sitios de unión para los *Rhizobia* por tetrámero. Su función, sin embargo, sigue siendo actualmente objeto de estudio y controversia. Una vez que la bacteria ha reconocido a su leguminosa, provoca la curvatura de los pelos radicales de la planta, proceso que posee una elevada especificidad, aunque se ha observado la reacción de curvatura ("curling") de una leguminosa frente a *Rhizobia* sp. no específicos suyos. Hay que distinguir, no obstante, entre una "moderada curvatura" de los pelos radicales y una "curvatura marcada", en la cual los pelos muestran en su extremo un ángulo de unos 180 grados. Sólo en el caso de "curvatura marcada" se puede hablar de gran especificidad, que ocurre únicamente cuando existe un contacto físico íntimo con el *Rhizobium* específico infectivo. Parte de los pelos radicales deformados conducen a la formación de nódulos; la infección parece iniciarse en los puntos más agudos de los pliegues de los pelos.

La observación de que *Rhizobium* no disuelve ni penetra la pared celular del pelo en el sitio de contacto condujo a la hipótesis de que la infección empieza a través de un proceso de invaginación del pelo radical. Tal invaginación va a dar lugar a la formación del cordón de infección, por donde *Rhizobium* penetra en el pelo y alcanza el citoplasma de las células corticales. Una vez allí tienen lugar una serie de reacciones enzimáticas que acabarán por romper el cordón, quedando las bacterias libres en el citoplasma de la célula huésped.

El cordón de infección es una estructura tubular, cuya superficie interna está formada por celulosa y rodeada por la membrana plasmática de la célula huésped. En su interior se encuentran las bacterias unidas extremo con extremo, inmersas en una matriz de polisacárido. El cordón crece hasta alcanzar la corteza de la raíz, donde se ramifica y divide. El crecimiento del cordón de infección ocurre probablemente por aflojamiento de la celulosa bajo la influencia de las auxinas producidas en el interior del tubo por *Rhizobium*, ya que estas hormonas inducen la síntesis de celulasas. La producción de auxinas "in vitro" por *Rhizobium* ha quedado claramente puesta de manifiesto.

Más tarde, el cordón de infección se disuelve, liberándose las bacterias al citoplasma de la célula huésped, como se ha observado en estudios al microscopio electrónico que muestran la erosión o disolución de la pared celular, y restos de ésta rodeando a las bacterias. Es lógico pensar que enzimas capaces de hidrolizar la pared celular intervengan en este proceso. Investigaciones recientes han puesto de manifiesto la producción de enzimas pécticos, celulasas y hemicelulasas por *Rhizobium* en cultivo puro. Según parece, las pectinasas intervienen de una manera destacada en los primeros estadios de la infección, mientras que las hemicelulasas y celulasas actuarían en la rotura de los filamentos de infección que liberan bacterias dentro del citoplasma de las células corticales envueltas en plasmalema formando bolsas o vesículas que contienen una o varias bacterias. La antigua hipótesis de la inducción por la bacteria de la producción de poligalacturonasa por las células radicales carece de suficiente apoyo experimental.

Sólo un porcentaje relativamente bajo de infecciones da lugar a nódulos. Cuando el cordón de infección alcanza el córtex de la raíz, las células de éste son estimuladas en su ritmo de división y a partir de ellas se desarrollará el nódulo. La mayoría de estas células iniciales del nódulo son disomáticas, pero se dividen también algunas células normales. Las células disomáticas producirán el tejido central del nódulo, en el cual las bacterias se transforman en bacteroides y tiene lugar la fijación de N_2. Las otras células darán lugar a los tejidos no infectados del nódulo: la corteza y un rudimentario sistema vascular que conecta con el floema y xilema de la raíz. Con respecto al origen de las células disomáticas, existe discusión en la literatura científica, pero una hipótesis comúnmente aceptada sostiene la participación de las citoquininas, junto con las auxinas, en la producción de estas células. De hecho se ha descrito la presencia de citoquininas en cultivos de *Rhizobium* sp.

Cuando la infección es a través de los pelos radicales, en la zona central del nódulo aparecen células invadidas y no invadidas según haya entrado o no en ellas el filamento de infección. Una vez invadida, la célula ya no se divide. Si la infección ocurre a través de los espacios intercelulares, generalmente en las zonas de aparición de raíces laterales, todas las células de la zona central del nódulo aparecen invadidas, ya que provienen de la división de las primeras células que se habían infectado.

La efectividad es la tercera propiedad o "característica simbiótica" de la asociación mutualística *Rhizobium*-leguminosa. Las reacciones clave de la fijación de N_2 ocurren en las células infectadas por *Rhizobium* en forma de bacteroides existentes en el tejido central del nódulo. Los bacteroides difieren de las células normales en su morfología, en que poseen alteraciones en los citocromos y otros componentes de la cadena de transporte de electrones y en que contienen nitrogenasa activa. Como consecuencia de la correcta expresión de esta característica, se desarrolla en el nódulo una secuencia de procesos bioquímicos que, en esencia, conducen a la reducción del N_2 de la atmósfera hasta NH_4^+, el cual pasa a la célula hospedadora en forma orgánica y del nódulo al xilema, siendo así transportados para su utilización por la planta.

Con el nombre de dinitrogenasa se conoce el complejo enzimático que cataliza la reducción del N_2 a NH_3. Su presencia ha quedado demostrada en todos los microorganismos fijadores. En líneas generales, se puede hablar de una similitud entre las dinitrogenasas, cualquiera que sea el tipo de microorganismo del que procedan, de tal forma que pueden formarse complejos por combinación de componentes de distinto origen. Dentro del nódulo se sabe que la dinitrogenasa está localizada en los bacteroides; pero hasta muy recientemente no se pudo demostrar de manera directa que *Rhizobium* poseía en su genoma la información necesaria para sintetizar y regular el funcionamiento de este enzima en ausencia de la planta.

El complejo enzimático está constituido por dos tipos de proteínas: dinitrogenasa (ferro-molibdo-proteína o componente I) y dinitrogenasa reductasa (ferro-proteína o componente II). Los requerimientos básicos para que opere la nitrogenasa son: condiciones anaerobias (el enzima es muy sensible al O_2), trifosfato de adenosina (ATP), iones magnesio (Mg^{++}) y una fuente de poder reductor.

Durante la reacción, la energía del ATP y los electrones del reductor producen un cambio conformacional en la ferroproteína y la convierten en un reductor con un potencial redox de -400 milivolt. La ferroproteína reducida transfiere electrones a la ferro-molibdo-proteína que, a su vez, reduce al N_2. La reducción de un mol de N_2 a dos de NH_3 requiere, en teoría, unos 21 moles de ATP.

Además del N_2, otros sustratos, entre los cuales el ion H^+, pueden ser reducidos por la nitrogenasa, e incluso cuando la reacción de la nitrogenasa es llevada a cabo en una atmósfera de N_2 puro, del 25 al 30 por ciento del reductor proporcionado a la reacción se consume en la reducción de H^+ a H_2. Energéticamente, hay que tener en cuenta que el consumo de ATP en la

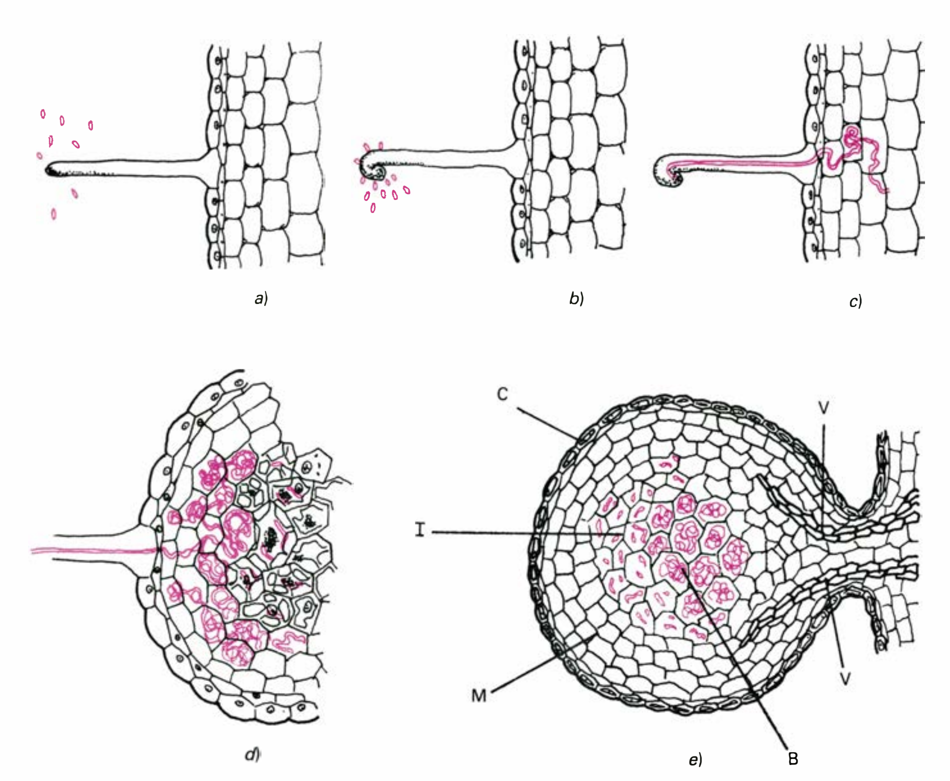
LEGUMINOSA/*RHIZOBIUM*	KG DE N/HECTAREA/AÑO
ALFALFA/*R. MELILOTI*	184-463
TREBOL/*R. TRIFOLII*	45-673
ALTRAMUZ/*R. LUPINI*	145-208
GUISANTE/*R. LEGUMINOSARUM*	52-57
SOJA/*R. JAPONICUM*	1-168
HABA/*R. LEGUMINOSARUM*	45-552

4. LAS CANTIDADES DE NITROGENO que son capaces de transferir desde la atmósfera a la biosfera las distintas leguminosas en simbiosis con su *Rhizobium*, según datos recopilados por Nutman para el Programa Biológico Internacional, dependen de la especie vegetal y de las condiciones ambientales en donde crece la planta. En el cuadro se exponen los valores correspondientes a leguminosas conocidas.

reacción de la nitrogenasa es aproximadamente el mismo cuando actúa como aceptor el N_2 que cuando lo hace el H^+. Esto indica que una gran cantidad de la energía aportada a la nitrogenasa se consume en la reducción del H^+. Por esta razón, puede perderse gran cantidad de energía, salvo que los organismos posean una actividad hidrogenasa que les permita reciclar el H_2 liberado con la recuperación de parte de la energía consumida.

La planta suministra la energía para que los bacteroides fijen nitrógeno en los nódulos; por esa razón, los factores que afectan a la fotosíntesis actúan de forma correlacionada sobre la fijación simbiótica de N_2. El producto principal del fotosintato que llega desde las hojas al nódulo es la sacarosa. No obstante, este azúcar no lo utilizan directamente los bacteroides, que aprovechan mejor los ácidos dicarboxílicos derivados del ciclo de Krebs en la metabolización por la célula hospedadora del fotosintato. El poder reductor se genera en el bacteroide mediante fosforilación oxidativa de los sustratos carbonados, y una ferredoxina transporta los electrones producidos hasta la dinitrogenasa.

Las preparaciones purificadas de nitrogenasa son extremadamente sensibles al oxígeno. Lo que explica que los microorganismos aerobios hayan desarrollado mecanismos especializados para la protección de la nitrogenasa "in vivo". Mientras que *Azotobacter* lleva a cabo tal protección mediante una respiración muy activa que crea cierta anaerobiosis funcional, los bacteroides de *Rhizobium* se encuentran protegidos del oxígeno por la baja difusión de este elemento a través de la célula hospedadora, llegando incluso a no disponer de la suficiente cantidad para poder producir la energía necesaria para la reducción del N_2. Pero existe, rodeando a las bolsas que contienen los bacteroides y dentro de ellas, una sustancia clave para el buen funcionamiento del proceso, la leghemoglobina, a la que se debe el color rojo de los nódulos efectivos. El oxígeno se combina con la leghemoglobina dando lugar a la oxileghemoglobina. Combinado de esta forma, el O_2 es transferido a la superficie del bacteroide, en donde la oxileghemoglobina se disocia muy lentamente, por lo que la concentración de O_2 libre en la superficie del bacteroide es siempre muy baja. Una vez allí, el O_2 es aceptado por un sistema de oxidasas muy especializado, que posee una afinidad poco común por él. Este



5. INFECCION DE LAS RAICES de leguminosas por *Rhizobium* para dar lugar al nódulo. Dicho proceso ocurre mediante una serie de etapas que, en esquema, son las siguientes. *Rhizobium*, en presencia de la raíz de la leguminosa correspondiente, prolifera (*a*) por efecto aparentemente inespecífico y es atraído específicamente hacia los pelos radicales donde origina la curvatura del extremo de los mismos (*b*). Por este lugar se produce una invaginación de la pared del pelo que da forma a un canal por donde penetra la bacteria constituyendo lo que se conoce por cordón o filamento de infección. Este filamento atraviesa algunas células corticales, ramificándose después (*c*) y penetrando en otras que se han dividido antes de forma anárquica por efecto de la proximidad de las bacterias (*d*). Estas son liberadas del filamento en el citoplasma celular rodeadas, por unidades o en grupos, por una membrana derivada del plasmalema de la célula hospedadora. Con la división celular se forma el nódulo (*e*), donde se pueden reconocer diferentes zonas: *C*) corteza nodular; *M*) zona meristemática apical, que da la forma particular a cada nódulo; *I*) zona de infección bacteriana y de crecimiento celular; *B*) zona fijadora (células ocupadas por bacteroides) y *V*) trazas del sistema vascular de la raíz. Este modelo corresponde a la alfalfa, trébol y soja.

sistema, que opera a bajas concentraciones de O_2, es altamente eficiente en la formación de ATP. La biosíntesis de la leghemoglobina manifiesta la íntima asociación de los dos organismos implicados: el grupo hemo es sintetizado por la bacteria mientras que la proteína es de origen vegetal.

El primer compuesto estable resultante de la reducción del nitrógeno es el amonio, como ya se ha indicado. Precisamente este amonio es el responsable de la regulación de la fijación. En los fijadores libres, la fijación no ocurre en presencia de nitrógeno combinado por inhibición de la síntesis de la nitrogenasa a nivel de transcripción. Los bacteroides de *Rhizobium* exportan a la célula hospedadora casi todo el amonio producido, por lo que no hay obstáculo que impida la síntesis de la nitrogenasa, ya que el producto de la reacción no la afecta. Pero interesa reseñar que el nitrógeno combinado manifiesta un claro efecto sobre la simbiosis *Rhizobium*-leguminosa. No sólo inhibe su establecimiento, sino que también mengua su rendimiento: en presencia de niveles medianamente altos de los compuestos de nitrógeno asimilables para la planta no hay nodulación y, si ésta llega a producirse, no hay fijación. Queda mucho por aclarar en torno a los mecanismos de tal comportamiento, lo que nos obliga a un exigente control del uso de fertilizantes nitrogenados en el cultivo de las leguminosas.

En cuanto al origen y evolución de la simbiosis *Rhizobium*-leguminosa, se ha avanzado bastante. En términos generales, se puede afirmar que el acontecimiento fundamental de la evolución de la vida en nuestro planeta en el período Paleozoico fue la conquista de las zonas terrestres por representantes de casi todos los *phyla* animales y vegetales. Los antecesores de las plantas superiores eran formas acuáticas y, para iniciar la colonización de hábitats secos y pobres nutritivamente, debieron sufrir una profunda transformación en su proceso evolutivo. Se sabe que esto ocurrió entre los períodos Silúrico

y Devónico, hace, aproximadamente, unos 400 millones de años.

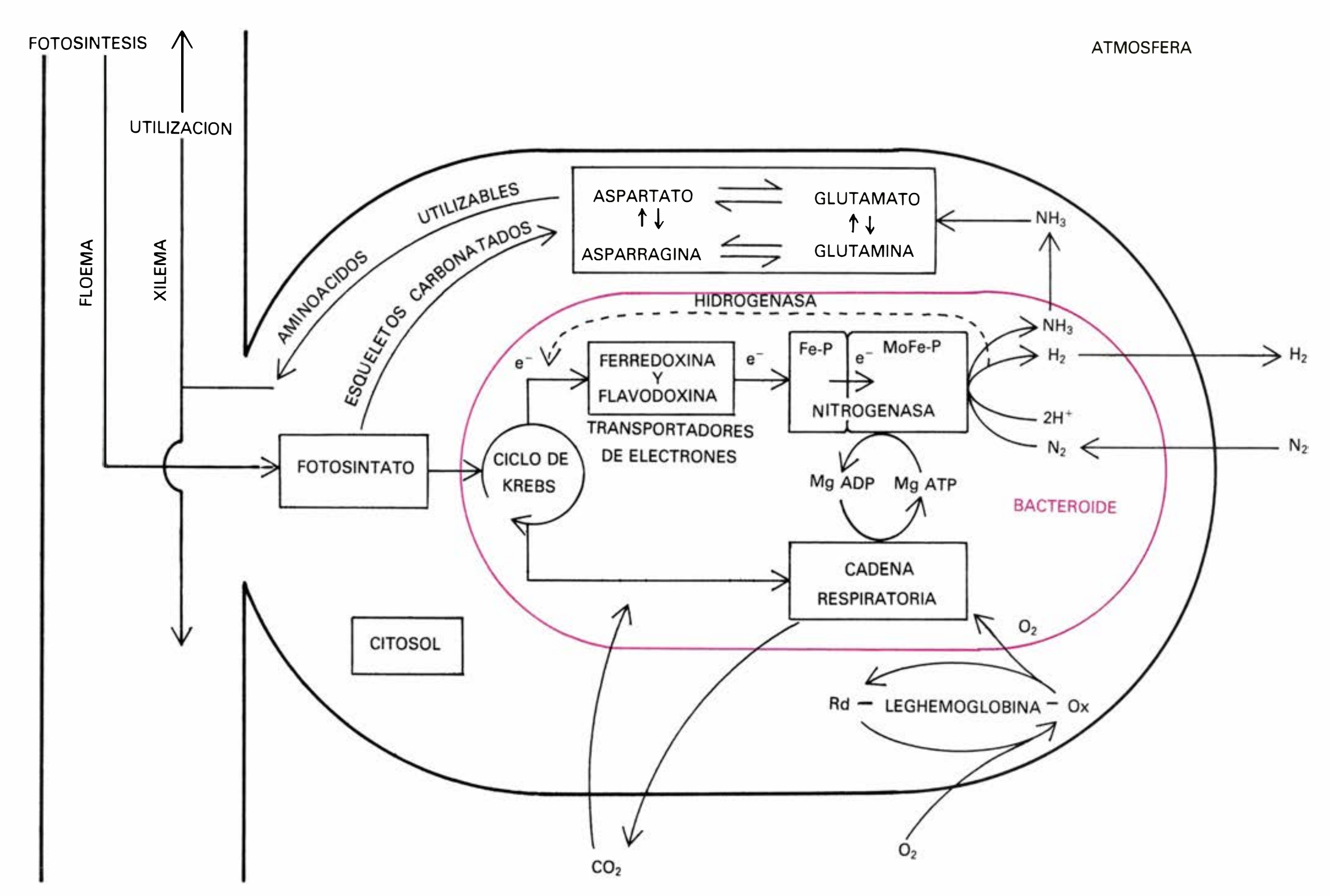
Las micorrizas influyeron, de una manera decisiva, en la evolución de las plantas, facilitando la captación de fósforo y agua a partir del suelo. La obtención del nitrógeno, el otro macronutriente principal de los vegetales, parece ser que fue posible porque el suelo estaba colonizado por bacterias y cianobacterias fijadoras de N_2 atmosférico. La existencia de organismos fijadores podría remontarse a unos 2000 millones de años. El carácter reductor y el requerimiento de anaerobiosis propios de la nitrogenasa son dos atributos que parecen completamente lógicos y adecuados para un enzima que debía actuar en una atmósfera anaerobia.

El origen de la fijación simbiótica de N_2 por la asociación *Rhizobium*-leguminosa es bastante posterior; se fecha su aparición entre los períodos Jurásico y Cretácico del Mesozoico, es decir, hace unos 150 millones de años, época en la que también debieron originarse los sistemas fijadores simbióticos en no-leguminosas.

Se han apuntado varias hipótesis para explicar el origen y evolución de esta simbiosis. Una de ellas indica que la asociación débese a una adaptación ecológica que debió ocurrir de acuerdo con las siguientes fases: *a*) asociación entre un fijador de vida libre y la planta sobre la superficie de la raíz (tal como la que hoy existe entre *Azotobacter paspali* y *Paspalum notatum*); *b*) establecimiento de la simbiosis dentro del tejido cortical de la raíz; y *c*) formación de un tejido especializado en la fijación de N_2, que es el nódulo. Según esta hipótesis, la selección natural fue abriendo camino a asociaciones cada vez más dependientes de la planta. De acuerdo con una segunda hipótesis, *Rhizobium* podía haber depositado parte de la información genética, o de su expresión, en la planta. No obstante, el descubrimiento de la capacidad de ciertos *Rhizobia* para fijar N_2 en vida libre indica que éstos poseen la información genética necesaria para desarrollar este proceso, y que las limitaciones estarían únicamente a nivel de expresión.

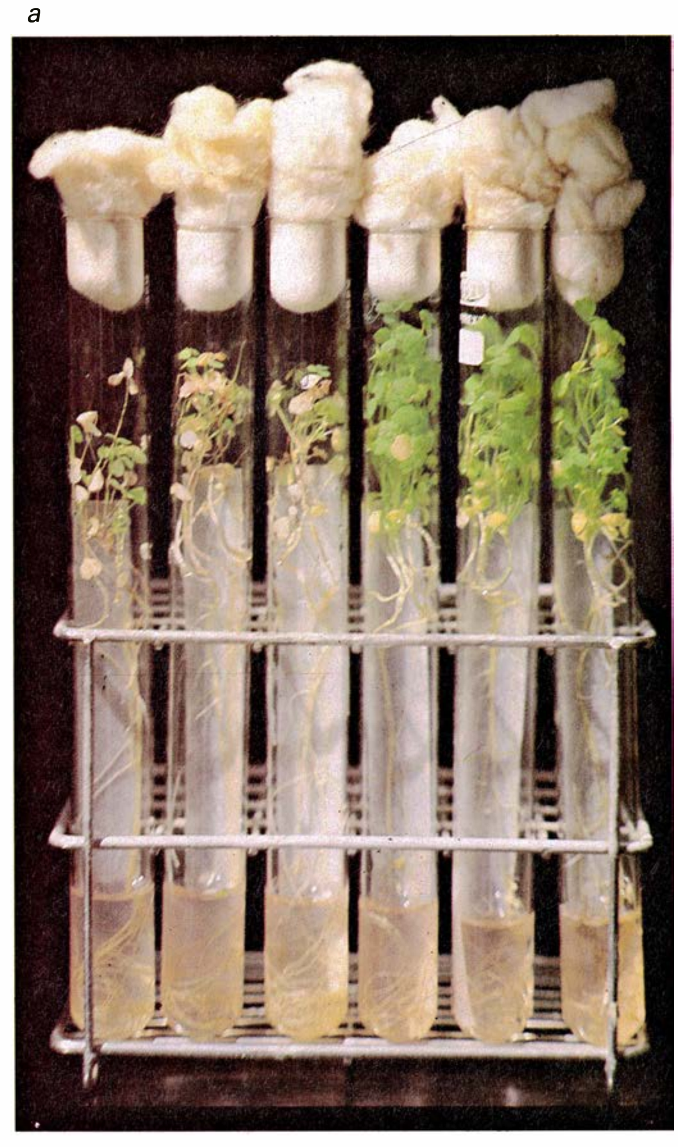
Finalmente, para una tercera hipótesis existiría una especie ancestral común para *Rhizobium* y *Agrobacterium*, que sería el proto-*Rhizobium*. La diferenciación de *Rhizobium* a partir del proto-*Rhizobium* debió ocurrir mediante una atenuación paulatina del poder patógeno, seguida de la adquisición, por parte de las bacterias del suelo, de un fragmento de ADN, probablemente un plásmido, que contendría los genes *nif*, o genes fijadores de nitrógeno. De hecho, la capacidad de inducir tumores por *A. tumefaciens* y de fijar nitrógeno por *Rhizobium* son características derivadas de la expresión de plásmidos de alto peso molecular, llamados por ello megaplásmidos.

El éxito de la inoculación en campo depende del uso de una raza de *Rhizobium* eficaz, de su empleo en la situación ecológica adecuada, aplicación en la forma apropiada y recurso coordinado y complementario a los fertilizantes químicos. Antes de cualquier ensayo de campo habrá de estimarse la necesidad de inocular, circunstancia que se decidirá mediante ensayos en

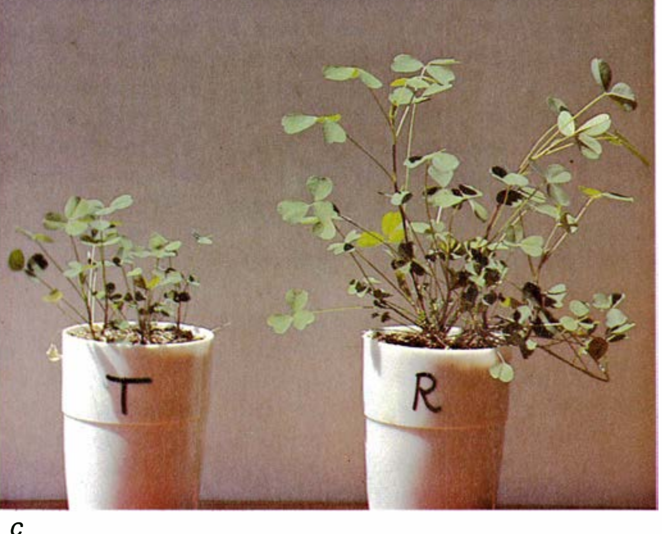


6. FIJACION DE NITROGENO DE LEGUMINOSAS por los bacteroides. Se realiza en el interior de las células vegetales que ocupan la zona central del nódulo. Hasta allí llega el fotosintato que va a ser fuente de energía, de electrones y de esqueleto carbonado para la incorporación del amonio formado. La leghemoglobina, que se encuentra en la solución que rodea al bacteroide, permite la difusión del oxígeno desde el exterior en cantidad suficiente para que puedan desarrollarse las reacciones de oxidación correspondientes, pero a un nivel tal que no se inhiba la actividad nitrogenasa. El amonio producido pasa al citosol de la célula, es incorporado al glutamato con intervención de la glutamino sintetasa y transferido al resto de la planta por el xilema.

a



b



c



7. PARA QUE LA APLICACION PRACTICA DE *Rhizobium* como "fertilizante biológico" tenga posibilidades de éxito es necesario llevar a cabo una serie de estudios básicos previos que permitan seleccionar la bacteria adecuada, establecer la necesidad de inocular, obtención del inoculante óptimo, etcétera. Las investigaciones necesitan, por tanto, cubrir una serie de etapas que deben seguirse de forma sistemática y ordenada, siendo en todo caso los ensayos de efectividad, en cuanto a la estimulación del crecimiento de las plantas, los que marcan pasos decisivos en su selección y aplicación de *Rhizobium*, tal como señala esta secuencia de fotografías: *a*) Experimentos en cuarto iluminado en condiciones asépticas. *b*) Ensayos de invernadero, en macetas, en los que se utilizan suelos naturales con sus poblaciones en *Rhizobium* autóctonos. Y *c*) Inoculación en campo, en parcelas piloto de experimentación. En las tres fotografías, las plantas de alfalfa inoculadas con *Rhizobium meliloti*, específico de la misma, figuran a la derecha de los controles no inoculados.

condiciones adecuadas para asegurar que la especie de *Rhizobium* existente en el suelo sea escasa o ineficaz, al menos. Prevalece el criterio de selección de razas de *Rhizobium* según el cual la raza seleccionada tiene que formar nódulos en las raíces del huésped bajo un espectro amplio de condiciones ambientales. Esto se garantiza a través de pruebas que aseguren su eficacia, capacidad para competir, sobrevivir y multiplicarse en el suelo. Otros criterios para seleccionar la raza adecuada podrían ser tolerancia a pesticidas, desecación, etcétera.

El proceso para producir el inoculante consiste, una vez seleccionada la raza de *Rhizobium* óptima, en obtener un cultivo masivo de ella, e impregnar con este cultivo un producto portador ("carrier"), que, conservado en condiciones adecuadas, se aplica con las semillas en el momento de la siembra. El estudio de los distintos portadores usados ha puesto de manifiesto que el mejor es la turba.

Parece ser suficiente que cada semilla reciba unas 100 células de *Rhizobium*, en caso de que se trate de un suelo libre de *Rhizobium* y con buenas condiciones para la supervivencia de la bacteria, aunque cuando exista una población nativa de *Rhizobium* ineficaz y condiciones adversas, se requieren más de un millón de *Rhizobia* por semilla para obtener niveles de inóculo satisfactorios.

La cantidad de cultivo líquido de *Rhizobium* con el que se va a impregnar la turba estéril, una vez seca y molida, debe ser tal que proporcione un *p*H entre 3,9-4,0. El producto así obtenido se introduce en recipientes adecuados que permitan la aireación, pero no la pérdida de agua. Una vez envasado, se aconseja una incubación a 28 grados Celsius durante 2 semanas y posteriormente su conservación a 4 grados C. La aplicación práctica de *Rhizobium* como fertilizante biológico constituye ya una realidad, con un buen rendimiento.

Las leguminosas son plantas capaces de formar dos tipos de asociaciones

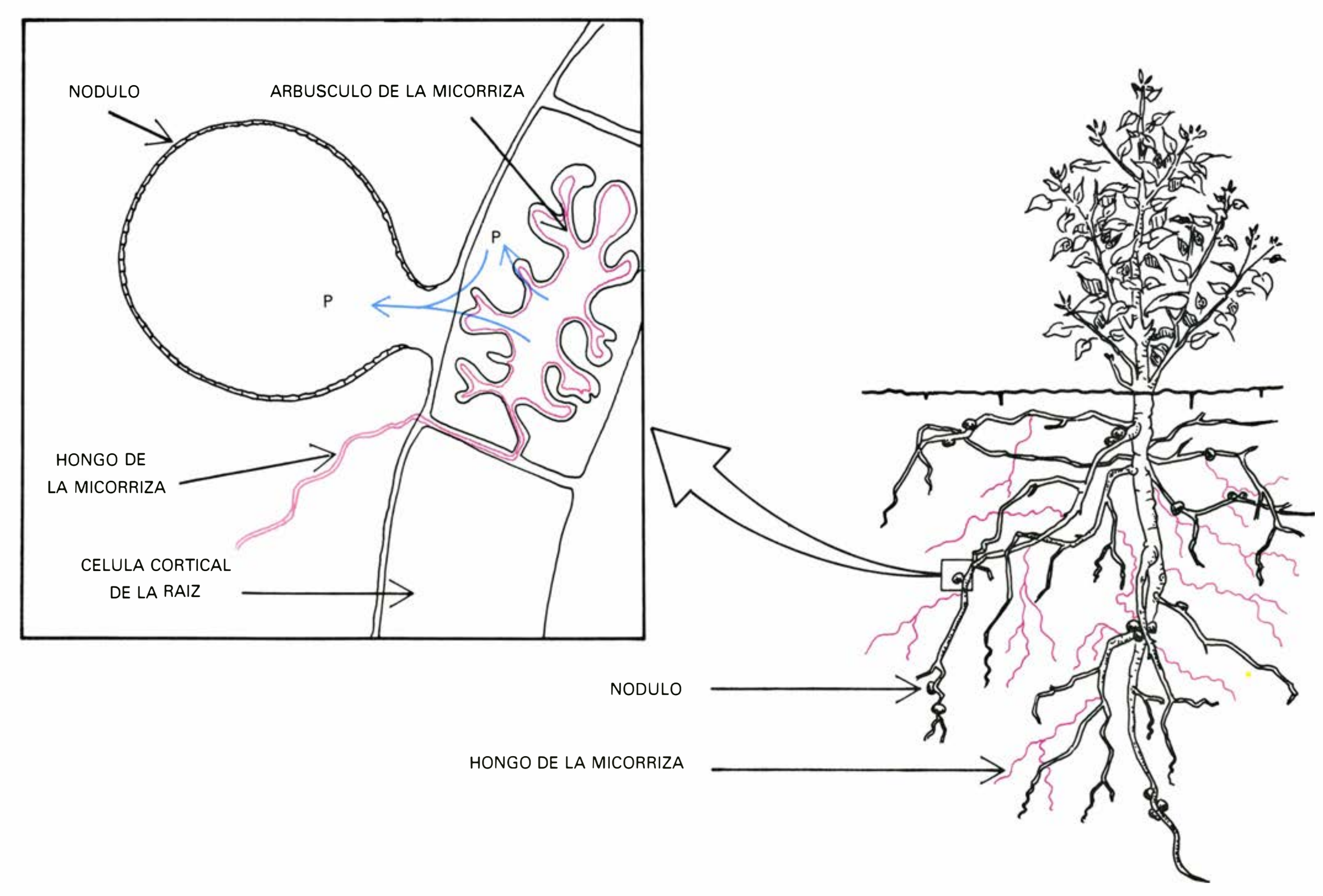
simbióticas con microorganismos: nódulos fijadores de N_2 y micorrizas VA, que proporcionan P a la planta [véase "Micorrizas", de Concepción Azcón G. de Aguilar y José M. Barea, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1980]. La coexistencia de ambas simbiosis en estas plantas conviene a la ecología y nutrición de las mismas, como se comenta seguidamente.

A mediados de siglo, Asai observaba que no había nodulación de varias especies de leguminosas crecidas en suelo esterilizado, e inoculadas con su *Rhizobium* adecuado, a no ser que las plantas estuvieran micorrizadas. El autor atribuyó estos resultados a que la micorriza eliminaba cierto efecto tóxico inducido por la esterilización del suelo. Por lo que hoy sabemos sobre el significado y mecanismo de acción de las micorrizas, los resultados de Asai pueden interpretarse de una manera distinta. Recientemente, se ha reconsiderado el planteamiento experimental de Asai y se ha puesto de manifiesto que la inoculación de hongos VA estimula el crecimiento de varias leguminosas en suelos deficientes en fosfato asimilable e incrementa el número y peso de los nódulos, contenido de éstos en leghemoglobina y la actividad nitrogenasa. Se ha llegado a la conclusión de que la estimulación se puede justificar si admitimos que la micorriza incrementa la concentración de fósforo en la planta hospedadora.

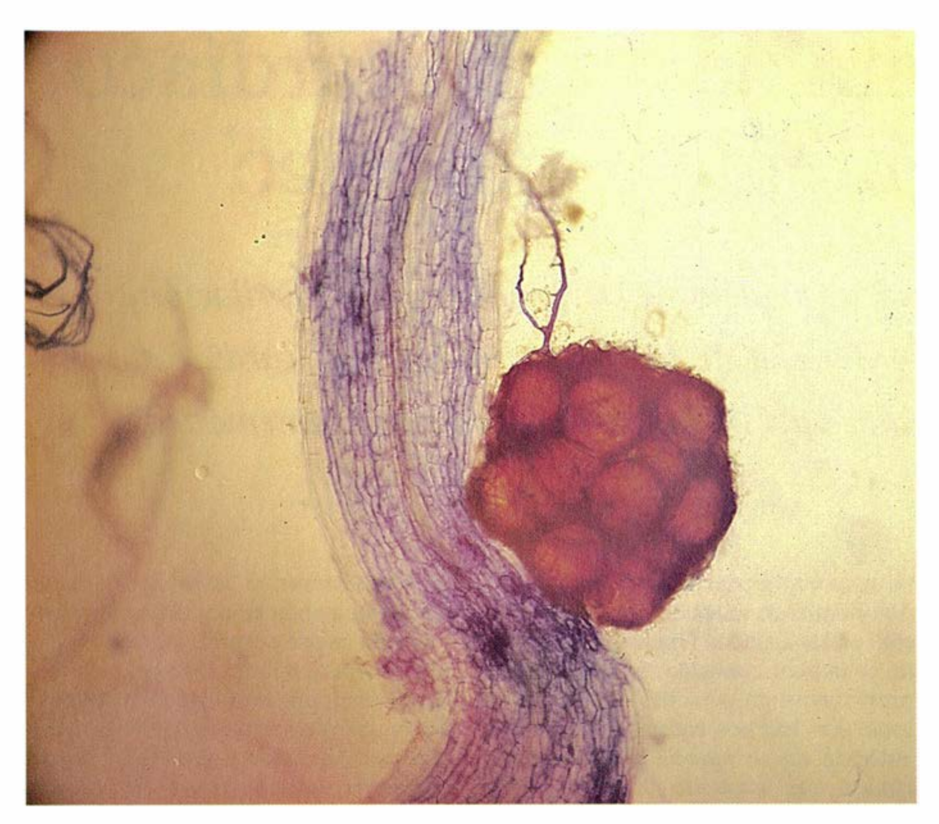
Se acepta que es necesario un aporte adecuado de fosfato para que la nodulación y la fijación de nitrógeno molecular en leguminosas se desarrollen con normalidad. Concretamente, se sabe que cuando la concentración de fósforo en la planta no llega al 0,2 por ciento con respecto al peso seco de ésta, la nodulación y la actividad nitrogenasa son despreciables; no se formarán siquiera nódulos cuando la concentración de fósforo caiga por debajo de 0,1 por ciento. Los efectos de las micorrizas sobre la nodulación y fijación de N preceden a los efectos sobre el crecimiento de la planta. Ello sugiere una llamada preferencial del P para dirigirse directamente al nódulo, hecho que se manifiesta cuando el P asimilable es escaso en los suelos.

En general, las leguminosas que crecen en condiciones naturales se encuentran fuertemente micorrizadas, debido quizás a sus considerables necesidades de fósforo y a la escasez de formas asimilables del elemento en el suelo. Existen algunas excepciones, como por ejemplo *Vicia sativa* y sobre todo *Lupinus* sp., que muestran cierta resistencia a la infección por micorrizas VA. Lo que tal vez sea consecuencia de que dichas plantas poseen sistemas especializados en una eficaz captación de fósforo.

Se ha sugerido que los hongos de la micorriza VA no interaccionan directamente con *Rhizobium*. Este hecho es



8. OPERATIVIDAD DE LA SIMBIOSIS *Rhizobium*-leguminosa. Depende de un aporte constante y relativamente elevado de fosfato al nódulo. Por ello, y dado que los suelos sin fertilizar no suelen ser autosuficientes para abastecer a la planta, la formación de micorrizas en leguminosas es de suma importancia en virtud del significado de dicha simbiosis en la nutrición fosforada de los vegetales. La posibilidad de un suministro directo de P desde los "arbúsculos" de la micorriza formados en células de la raíz adyacentes a los nódulos es de gran relevancia. Los "arbúsculos" son formaciones de doble membrana (de ambos simbiontes) en donde ocurre, por un mecanismo activo y específico, la transferencia de P desde el hongo de la micorriza hasta la planta. Este elemento llega al "arbúsculo" translocado desde el suelo a través del micelio del hongo. Se sabe que 1 centímetro de raíz micorrizada puede tener más de 1 metro de filamentos externos de hongo, que poseen una gran afinidad para captar P del suelo, operación que ejecutan hasta en microhábitats situados unas 50 veces más lejos de la superficie de la raíz que aquellos otros sobre los que actuaría ésta cuando no se halla micorrizada. El P circula hacia el "arbúsculo", en forma de gránulos de polifosfato, a unas 1000 veces más rápido que si circula por simple difusión a través de la solución del suelo.



9. ESPORAS Y ESPOROCARPOS DEL HONGO de la micorriza. Al igual que los que muestra la foto, asociados a raíz de alfalfa, aseguran la persistencia de efectos de estos hongos sobre la simbiosis *Rhizobium*-leguminosa a lo largo de cosechas sucesivas de estas plantas en la práctica agrícola.

apoyado por la circunstancia de que el micelio del hongo no invade el tejido nodular, aunque sí las células adyacentes al nódulo. Además del efecto mediado por el aporte de fósforo, no se puede descartar una cooperación de los microorganismos responsables en el momento de la formación de ambas simbiosis. La investigación de tal posibilidad prosigue en nuestro departamento, habiéndose apuntado interacciones de ambos microorganismos en las que parecen estar implicados fenómenos tales como la síntesis de fitohormonas por *Rhizobium* y hongos VA, producción de enzimas pécticos que relajan la pared celular de la planta hospedadora común. Estas interacciones sugieren una cooperación en el establecimiento de la doble simbiosis.

La formación de dobles simbiosis tiene gran importancia desde el punto de vista ecológico. Se ha hablado de que plantas con ambos tipos de simbiosis pueden actuar de pioneras en la colonización de nuevos hábitats. Además, poseen una fuerte capacidad para competir con otras en hábitats pobres en nutrientes (suelos marginales, en general, con especial incidencia en el caso de suelos erosionados).

Si bien las leguminosas pueden estar bien noduladas y micorrizadas cuando crecen en condiciones naturales, las modificaciones introducidas por el hombre (monocultivo, aplicación descontrolada de fertilizantes, tratamientos con pesticidas y herbicidas) han llevado consigo una pérdida de la infectividad de los suelos. En estos casos, así como en aquellos en los que se trata de recuperar suelos marginales, la introducción de endófitos adecuados puede resultar útil para el desarrollo de las leguminosas. Se han realizado ensayos con vistas a la implantación de pastizales a base de trébol convenientemente inoculados con *R. trifolii* y hongos formadores de micorrizas VA, para estudiar la capacidad competitiva de endófitos introducidos frente a los indígenas. Nosotros mismos hemos practicado la “fertilización biológica” de alfalfa y zulla con sus microorganismos simbióticos *Rhizobium* y *Glomus mosseae* (hongo VA), en ensayos de campo, con alentadores resultados. La utilización de “fertilizantes biológicos” en el cultivo de las leguminosas no es más que una manera de aprovechar el potencial natural del suelo y las plantas. Como consecuencia de su correcto uso, se ganan alimentos (proteínas), se ahorra dinero (fertilizantes químicos) y se evita la alteración de los ecosistemas.

Muerte súbita de origen cardíaco: un problema topológico

Gran número de muertes repentinas se producen por fibrilación, una contracción desordenada de las fibras musculares cardíacas. ¿Podemos buscar la causa del trastorno en un teorema matemático?

Arthur T. Winfree

Aquella del 7 de noviembre de 1914 era una mañana límpida y fresca. Había caído en sábado. En la Facultad de Medicina de la Universidad McGill de Montreal, semivacía de profesores y alumnos, nadie reparó que George Ralph Mines abría la puerta de su laboratorio para realizar un ensayo de fin de semana. Aquel fisiólogo de 28 años había centrado sus esfuerzos en el estudio de la fibrilación ventricular, una desorganización completa del patrón de contracción cardíaca. En condiciones normales, el ventrículo se contrae en bloque; mas, en situación de fibrilación, las distintas regiones del músculo cardíaco lo hacen con rapidez y sin que se vea coordinación alguna con el tejido inmediato.

Mines se había propuesto averiguar si con estímulos eléctricos breves y de escasa intensidad podía provocar la fibrilación. Construyó un aparato que permitía aplicar al corazón estímulos eléctricos de una magnitud y una frecuencia regulables a voluntad, con precisión. Ensayó primero el aparato con animales de experimentación. Y cuando pensó que había llegado la hora de abordar el estudio en humanos, escogió al sujeto que tenía más a mano: él mismo. Serían las seis de la tarde cuando el conserje entró en la estancia, sorprendido de tanta tranquilidad en el laboratorio. Encontró a Mines tirado bajo el banco de ensayos, rodeado de cables retorcidos y un dispositivo medio roto sujeto a la región precordial. No lejos, un aparato seguía registrando los vacilantes latidos de su corazón. Murió sin recobrar el conocimiento.

La muerte de Mines habría quedado en una tragedia personal sin interés científico de no ser por el tema de su último trabajo. La fibrilación constituye una de las causas más importantes del síndrome de muerte cardíaca súbita, responsable del fallecimiento de varios cientos de miles de personas al año sólo en los Estados Unidos. Tristemente, es la peor conocida. Se presenta sin previo aviso en personas de apariencia sana. En muchos casos, al realizar la autopsia no se aprecia ninguna razón clínica que explique la interrupción brusca de la contracción coordinada del corazón. El trabajo de Mines arrojó luz sobre el problema: demostró que podría provocarse la fibrilación mediante un impulso eléctrico, relativamente pequeño, si dicho estímulo se aplica al corazón en el momento preciso. Mucho se ha investigado, desde 1914, sobre la muerte súbita y la fibrilación, pero seguimos sin saber por qué mecanismo un estímulo de escasa intensidad desencadena una respuesta tan drástica en el corazón.

Quizá parezca sorprendente que la topología, una rama de la matemática, venga en nuestra ayuda para desentrañar el problema. Al igual que otros sistemas fisiológicos, el tejido cardíaco produce una descarga eléctrica rítmica. Si se aplica un estímulo eléctrico externo a un fragmento de tejido cardíaco, lo más probable que ocurra es que se adelante o se retrase el ritmo espontáneo, sin que cambie, tras el estímulo, el intervalo que separa los latidos espontáneos. Mas he aquí que un teorema topológico demuestra que debe existir un estímulo, de escasa magnitud, incapaz de producir la respuesta prevista si se aplica en un momento determinado del ciclo de latidos. Los resultados experimentales manifiestan que, aplicando ese estímulo especial, se interrumpe el latido normal.

El cese de la contracción en una zona restringida del corazón no debe considerarse fibrilación. Pero se demuestra topológicamente que alrededor de la zona de tejido que detiene su latido se crea una situación favorable para que circule una onda de impulsos eléctricos. La onda puede desplazarse por el corazón usurpando la función del marcapasos normal; en su propagación, generaría ondas menores que provocarían la contracción rápida y carente de coordinación de pequeñas zonas del corazón. Los modelos más verosímiles de fibrilación construidos hasta hoy sugieren la presencia de ese tipo de ondas de activación.

Los argumentos que aduciré en favor de la fibrilación causada por un solo estímulo no han recibido ninguna confirmación experimental todavía. Habrán de considerarse como razonamientos matemáticos cuya demostración requiere amplios ensayos en el laboratorio de fisiología animal. Aun cuando llegaran a confirmarse, sus implicaciones clínicas no se desvelarían por ello. Lo que no obsta para que admitamos que la topología ofrece un nuevo enfoque del problema implicado en la muerte cardíaca súbita.

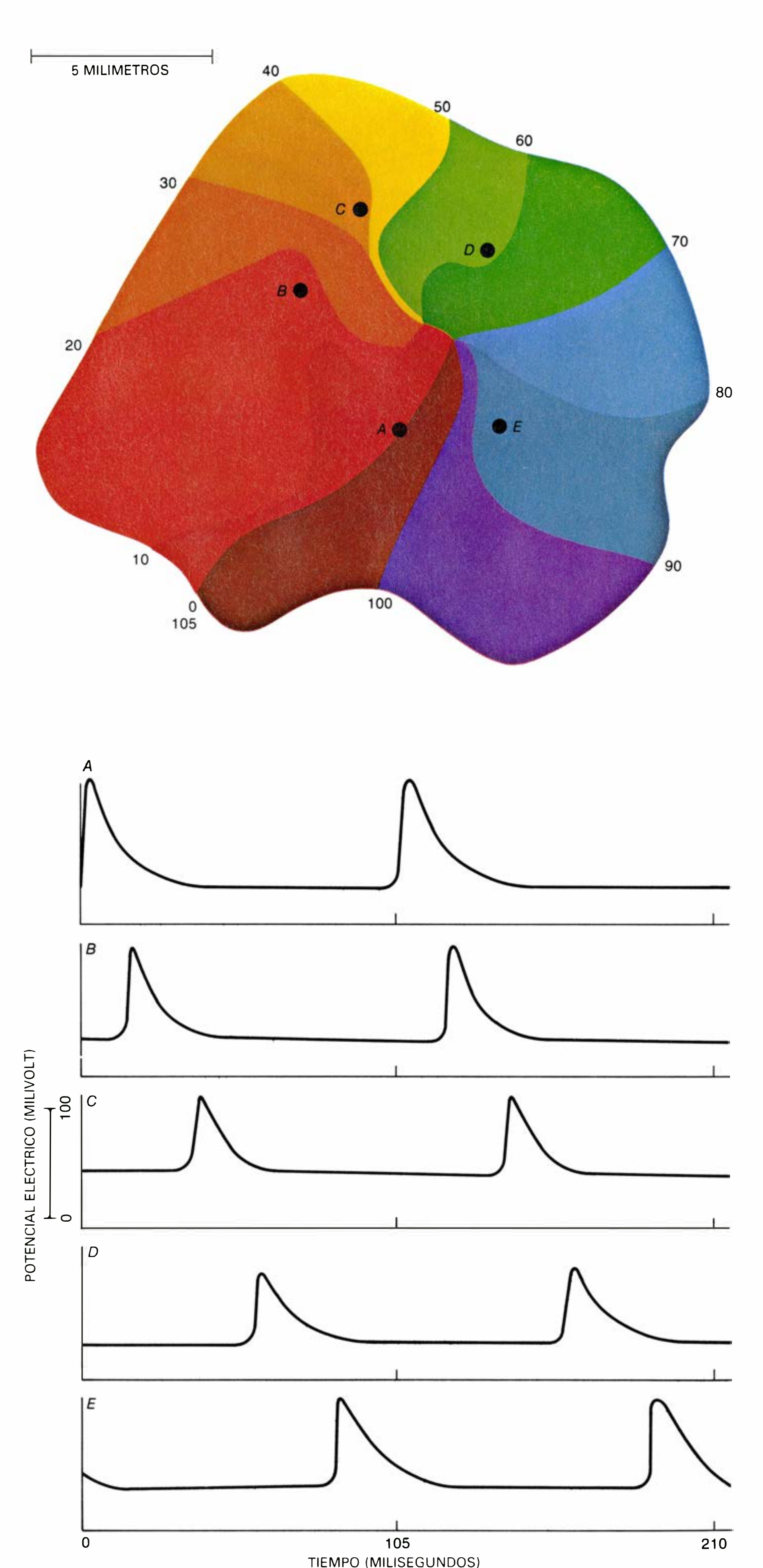
Antes de abordar la aplicación de la topología al estudio del ritmo cardíaco, merece la pena repasar la estructura y función del corazón de los mamíferos. Se trata de un órgano cuya extraordinaria complejidad nos impide analizarlo aquí en sus pormenores. Insistiremos en las propiedades que tengan que ver con el discurso topológico. Consta el corazón de cuatro cavidades: dos aurículas, que sirven de bombas de inyección, y dos ventrículos, de un tamaño mayor, que constituyen las bombas de expulsión principales. Aunque el corazón se contrae en bloque, como una sola pieza, si lo observamos con atención advertiremos que la contracción empieza en las aurículas para propagarse en seguida a los ventrículos.

¿Cómo entran en coordinación las

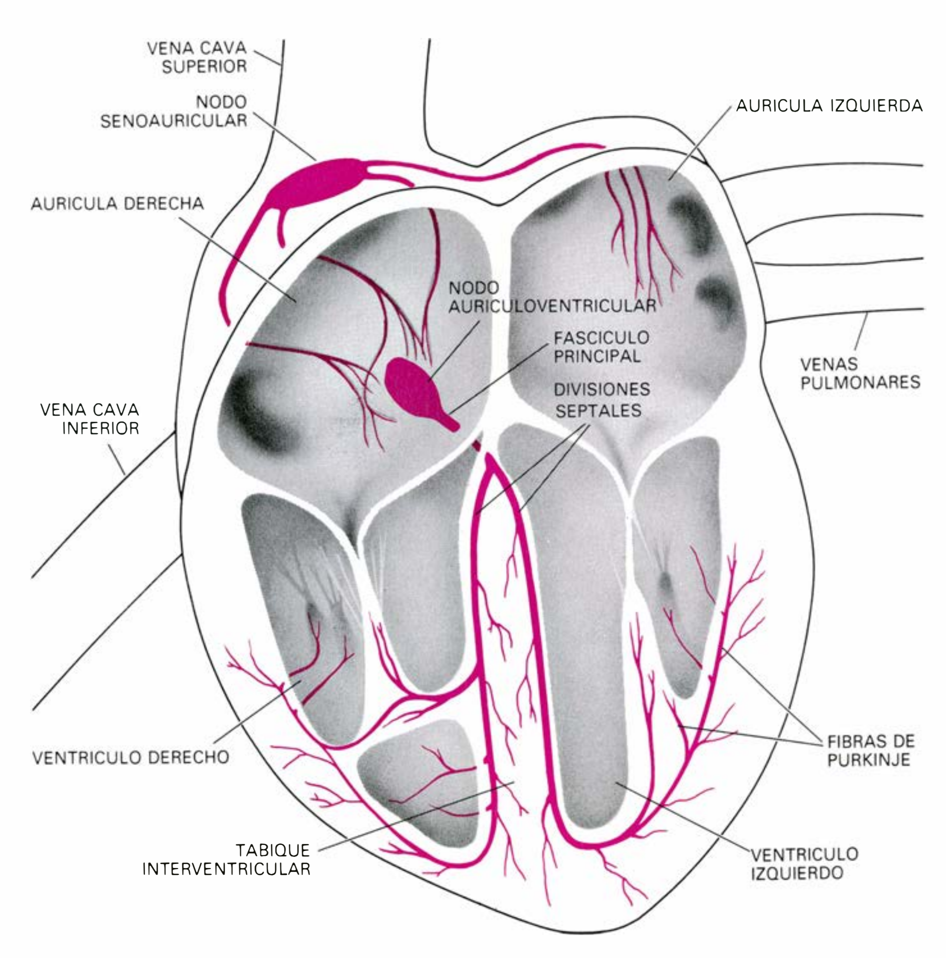
cuatro cavidades? Mediante la transmisión, a través del músculo cardíaco, de una onda de impulsos eléctricos que pasa rápidamente de una célula a otra. Las células que constituyen el corazón son musculares de distintos tipos y especializadas; tienen forma de fibras alargadas. Cuando la fibra se encuentra en reposo, el potencial eléctrico del interior de la membrana es algo inferior (vale decir, más negativo) que el de la parte exterior de la misma. El estímulo de contracción muscular lo provoca un aumento súbito del potencial del interior de la membrana, a cuyo término el interior celular queda, por un instante, eléctricamente positivo en relación con el exterior celular. El potencial torna, luego, a descender.

Los cambios que experimenta el potencial eléctrico vienen suscitados por el flujo de distintos iones (átomos con carga eléctrica) a través de la membrana celular. El aumento súbito de potencial se denomina despolarización; se propaga a lo largo de la fibra muscular en las mismas condiciones que el llamado "potencial de acción", transmisor de información en el sistema nervioso. Al paso del potencial de acción sigue un período refractario, que dura escasas décimas de segundo, en cuyo intervalo ningún estímulo normal desencadenará un nuevo potencial en esa misma fibra.

Las fibras cardíacas se hallan estrechamente adosadas unas a otras. En las membranas celulares hallamos, además, orgánulos especializados que constituyen zonas de escasa resistencia eléctrica; facilitan el paso del estímulo electroquímico de una célula a otra, y así, un estímulo que se origine en un punto del corazón puede transmitirse rápidamente al órgano entero. Hay en el corazón ciertos tejidos que tienen capacidad de generar estímulos espontá-



1. ONDA ROTATORIA de impulsos eléctricos. Se postula aquí que circula indefinidamente en el corazón y subyace a la fibrilación. En el corazón que fibrila se contraen rápidamente pequeñas zonas de tejido muscular sin ninguna coordinación. Si la fibrilación persiste más de cinco minutos, el desenlace suele ser fatal. El mecanismo que provoca la contracción de las células musculares del corazón es un estímulo electroquímico. En determinadas circunstancias, ese estímulo se propaga siguiendo un circuito. En la parte superior de la ilustración se muestra el movimiento circular provocado experimentalmente en tejido miocardíaco de conejo por Maurits Allessie y sus colegas, del Centro de Biomedicina de Maastricht, Holanda. Las zonas de color indican la distancia recorrida por la onda de activación en 10 milisegundos. La rotación completa requiere 105 milisegundos. Los trazos de la parte inferior muestran los potenciales eléctricos registrados en los cinco puntos señalados. El aumento brusco del potencial que aparece periódicamente revela el paso de la onda de activación circular.



2. ES EL CORAZON HUMANO una bomba con cuatro cavidades. Las aurículas son las bombas de llenado de los ventrículos, y éstos las bombas de expulsión principales. La contracción está sincronizada por impulsos eléctricos que se originan en el nodo senoauricular, que descarga estímulos de procedencia intrínseca de manera regular y sirve de marcapasos al corazón. Su estímulo provoca directamente la contracción de las aurículas, alcanza al nodo auriculoventricular y se transmite a la masa muscular de los ventrículos a través de fibras especializadas de conducción: el fascículo principal, sus divisiones septales y las fibras de Purkinje. En condiciones normales, el corazón se contrae prácticamente en bloque.

neamente y a intervalos regulares; son los llamados marcapasos; el que presenta la frecuencia intrínseca más alta domina el ritmo de todo el corazón.

El marcapasos más rápido de un corazón sano es una masa breve de tejido situada cerca del techo de la aurícula; conocida por nodo senoauricular, es el responsable directo del comienzo de la contracción de las aurículas. Su estímulo se transmite también al nodo auriculo-ventricular, un segundo marcapasos ubicado entre la aurícula y el ventrículo derecho. Desde el nodo auriculoventricular, el estímulo pasa a la pared de los ventrículos, a través de las fibras de Purkinje, especializadas en la conducción rápida de los estímulos eléctricos. Se extienden éstas por los ventrículos adoptando una disposición que semeja la de las raíces de un árbol. Cuando el impulso procedente del marcapasos pasa de la fibra de Purkinje a la masa del músculo ventricular, se inicia la onda de contracción, que se propaga por todo el ventrículo en cuestión de milisegundos.

El corazón de un individuo en reposo se contrae una vez por segundo, aproximadamente. La frecuencia intrínseca del nodo senoauricular, que determina la frecuencia de reposo, puede acelerarse o retrasarse por impulsos que le llegan a través de nervios que proceden del cerebro, de los ganglios simpáticos o de los órganos internos. Inervan todo el corazón, si bien sus terminaciones adquieren especial densidad en los sistemas marcapasos. Así, por ejemplo, el nervio vago tiene una influencia muy notable en la frecuencia local de contracción y en la coordinación de todo el corazón.

La aceleración y retraso de la contracción cardíaca están sincronizadas de un modo sutil. Pero el mecanismo falla en cuanto se interrumpe el aporte sanguíneo a una zona del corazón: cuando se produce un infarto. La sincronización se altera también si se expone el corazón a concentraciones elevadas de hormonas e iones. Incluso en ausencia de lesiones físicas o químicas se resentirá dicha sincronía: cuando perturbamos la actividad cardíaca con estímulos eléctricos de cierta intensidad, así en la electrocución. O si aplicamos un estímulo pequeño en un momento especialmente desfavorable. Vamos a ver cómo este estímulo mínimo desencadena la muerte cardíaca súbita.

Aunque el fenómeno se conocía desde mucho tiempo antes, fue John A. McWilliam, de la Universidad de Aberdeen, quien comenzó a usar, en 1887, la expresión muerte cardíaca súbita. Observó que en algunos casos de muerte repentina el corazón entraba en una actividad violenta y desordenada, en el *delirium cordis* o locura del corazón, según decían los médicos del XIX. El actual término de fibrilación se introdujo en la década de 1870. En opinión de Willis A. Tacker, Jr., y Leslie A. Geddes, de la Universidad de Purdue: “cuando se sostiene en la mano un corazón que fibrila parece una madeja de gusanos inquietos. En muchos casos, el ritmo de este proceso anárquico es tan frenético que diríase que el corazón está temblando. En otros, se observan con nitidez numerosas ondas de contracción y relajación”. Si la fibrilación se prolonga más de cinco minutos la muerte resulta casi inevitable. Tras algunos movimientos respiratorios espasmódicos, la respiración cesa y el enfermo adquiere un color azulado por falta de oxígeno en la sangre. El paro respiratorio produce a veces convulsiones y estertores.

No hay acuerdo entre los fisiólogos, sobre el mecanismo desencadenante de la fibrilación. Cuanto sabemos de la transmisión de los estímulos eléctricos en los sistemas fisiológicos procede del estudio de membranas celulares aisladas. Línea de trabajo que reviste especial interés en el conocimiento de las células del sistema nervioso, y sirve de poco para desentrañar la fibrilación. Es esta, en efecto, una alteración de la sincronización de la contracción cardíaca, no una disfunción de fibras individuales; se altera el mecanismo que coordina la actividad de las fibras musculares. Lo más probable quizá sea que, en el corazón con fibrilación, la respuesta de las distintas fibras sea normal y se altere la secuencia de la propagación del estímulo, lo que provocaría la desorganización total de la contracción del músculo cardíaco.

¿Cuál puede ser la razón de que miles de fibras pierdan, de repente, su precisa coordinación mantenida a lo largo de toda una vida? Maurits Allessie, del Centro holandés de Biomedici-

na de Maastricht, me hizo saber que en un trabajo que el malogrado Mines había enviado a una revista médica poco antes de su muerte atribuía la fibrilación a una onda eléctrica que se movía en círculo por el músculo cardíaco.

En su trabajo, Mines aplicaba impulsos eléctricos al corazón, variando el momento preciso del estímulo a lo largo del intervalo que separa dos contracciones consecutivas. La mayoría de los estímulos inducidos por Mines no ejercían ningún efecto persistente y nunca originaban una onda rotatoria clara en el tejido cardíaco. Pero puntualizaba: "en determinadas circunstancias, un estímulo de corta duración puede producir la fibrilación... si se dispara en cierto instante... Ningún estímulo puede provocar la fibrilación a menos que se produzca en el momento oportuno". El momento justo en que un estímulo menor provoca la fibrilación ventricular se descubrió muchos años después de la muerte de Mines; hoy se conoce por fase vulnerable.

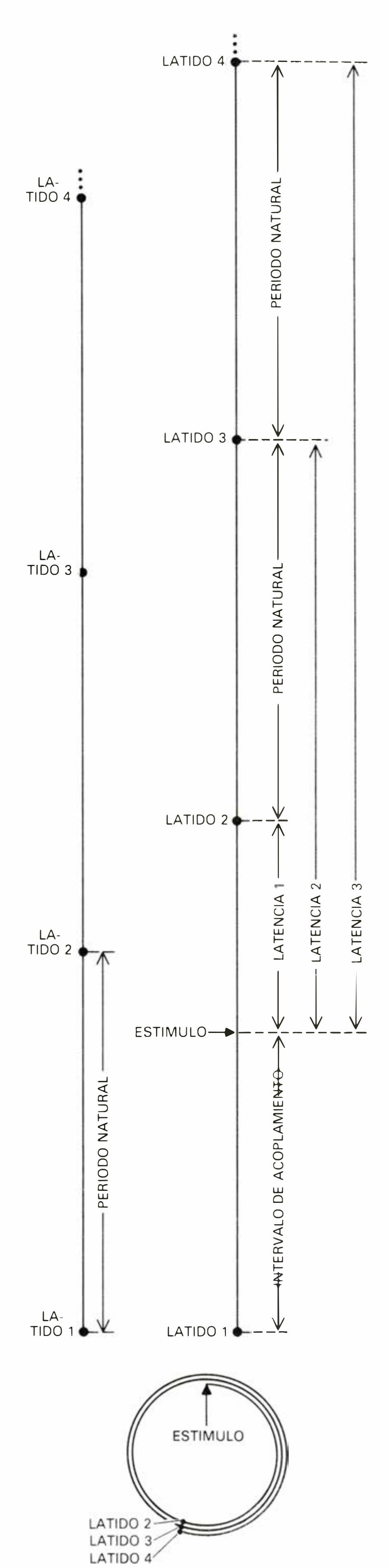
Mi interés por la fase vulnerable se debe a que fui testigo impotente de dos muertes cardíacas súbitas. Cuando ello ocurrió, trabajaba en los mecanismos biológicos que regulan los ritmos circadianos, los ciclos intrínsecos de 24 horas de duración que presentan muchos organismos. Algunas características topológicas relacionadas con los sistemas circadianos me indujeron a pensar que un estímulo único y breve, aplicado en el momento idóneo, podría provocar la pérdida del ritmo en organismos que hasta entonces lo habían mantenido con regularidad. Logré encontrar ese estímulo y demostrar su efecto, como repitieron después otros colegas.

Las propiedades topológicas de los ritmos circadianos que los hacen susceptibles de alteración ante un simple estímulo extienden su campo de aplicación a los sistemas fisiológicos que producen descargas eléctricas rítmicas: las células nerviosas, las fibras musculares cardíacas y el corazón como un bloque. Se llama propiedad topológica a la característica de una figura geométrica que no se pierde cuando la figura en cuestión se dobla, retuerce, estira o deforma de un modo progresivo. Así, por ejemplo, la imagen distorsionada por una lente es equivalente, topológicamente hablando, a la imagen sin distorsionar.

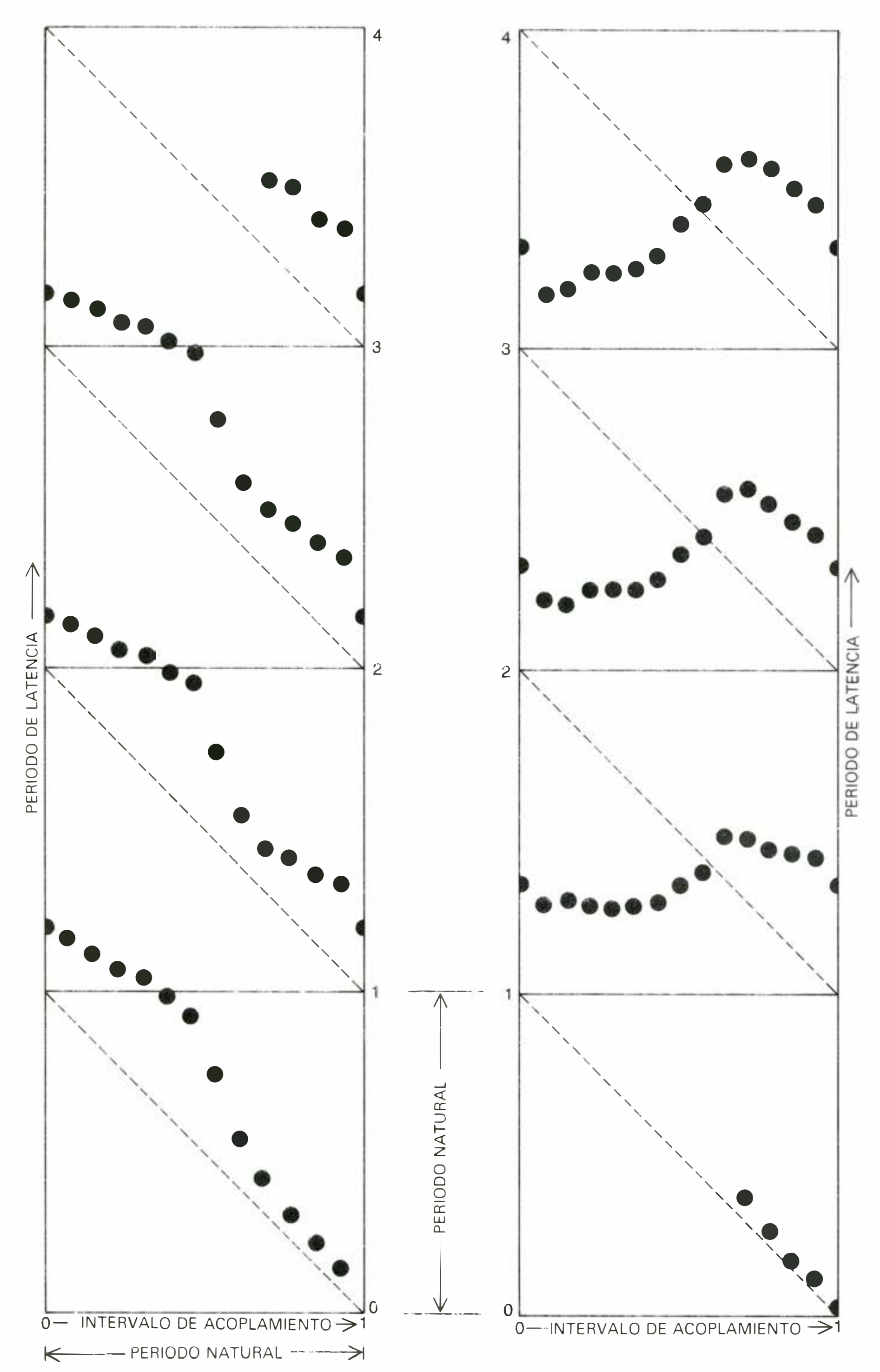
Definiremos la topología como el estudio de las propiedades que permanecen inalteradas a pesar de los cambios cuantitativos (mas no cualitativos). Las inferencias deducidas de axiomas topológicos pueden servirnos de gran ayuda para efectuar predicciones prescindiendo de los aspectos cuantitativos del problema. La argumentación topológica resultó de suma utilidad en el trabajo de ritmos circadianos, porque era muy poco lo que sabíamos acerca del mecanismo de éstos y los modelos cuantitativos sólo podían fundarse en suposiciones. Pero es enorme la información cuantitativa que disponemos sobre la coordinación del latido cardíaco. Centrando la atención en determinadas propiedades topológicas del latido podemos entresacar, de semejante cúmulo de datos, los necesarios para desentrañar el mecanismo desencadenante de la fibrilación.

Las propiedades topológicas del latido cardíaco que nos son de interés aquí las destacó ya en 1930 J. C. Eccles, de la Universidad de Oxford. Al igual que Mines, Eccles investigaba el efecto producido por la estimulación externa sobre la contracción cardíaca; pero había acotado su área de trabajo al estudio de los latidos subsecuentes al estímulo, no al de la propagación de las ondas circulantes de la fibrilación. Ensayando con perros, les estimulaba el corazón activando el nervio vago, que, lo dijimos más arriba, participa en la regulación de la frecuencia cardíaca en el corazón normal. Eccles observó que, después del estímulo, el corazón tornaba en seguida a su ritmo normal. En la mayoría de los casos, la recuperación era tan rápida que el ciclo cardíaco siguiente a la estimulación tenía la duración habitual: el efecto producido por la estimulación se limitaba a un desplazamiento de la secuencia normal.

Desde 1930 asistimos al desarrollo de un vocabulario más ajustado para des-



3. UN ESTIMULO ELECTRICO aplicado al corazón puede adelantar o retrasar el latido siguiente. El intervalo entre dos latidos de un ciclo espontáneo normal (*línea vertical de la izquierda*) se denomina período natural. Cuando se aplica al corazón un estímulo externo (*líneas verticales de la derecha*), el tiempo que transcurre entre el latido anterior al estímulo y el estímulo se denomina intervalo de acoplamiento. La diferencia temporal entre el estímulo y un latido posterior se denomina latencia. Hay tantas latencias cuantos latidos aparezcan después del estímulo. Pueden suprimirse los períodos naturales de las latencias enrollando la línea de latencia alrededor de un círculo de circunferencia igual al período natural (*círculo inferior*). En estas circunstancias vemos que los puntos que corresponden a los latidos se superponen. Estos latidos han sufrido todos el mismo adelanto o retraso y, por consiguiente, entre ellos media un período natural. El efecto principal que produce el estímulo consiste en retrasar o adelantar el ritmo normal, pero se mantiene la periodicidad. La terminología empleada para describir estos cambios puede aplicarse también a cualquier sistema que tenga capacidad de descarga rítmica. El "latido" será, en ese caso, el suceso que señala el final del ciclo.



4. REAJUSTES DEBILES Y FUERTES DE SECUENCIA. Se trata de dos patrones topológicamente distintos de los latidos que siguen a la aplicación de un estímulo externo. Los datos de la gráfica proceden del estudio realizado por José Jalife y Joseph J. Salata, del Hospital Clínico Upstate de la Universidad estatal de Nueva York en Siracusa. Los puntos representan los latidos que se producen al aplicar estímulos de una determinada intensidad con intervalos de acoplamiento que van de cero a un período completo. Si los estímulos son tan débiles que no adelantan ni retrasan el latido siguiente, el intervalo de acoplamiento y la latencia varían inversamente, y los puntos se sitúan en la diagonal de los recuadros. Si el estímulo tiene intensidad suficiente, el siguiente latido se adelanta o retrasa y los puntos caen fuera de la diagonal. No obstante, cuando la intensidad del estímulo es inferior a un determinado valor, la latencia sigue decreciendo a medida que aumenta el intervalo de acoplamiento, y se presentan todos los valores de latencia posibles. Este comportamiento se denomina reajuste débil de secuencia (*izquierda*). Si el estímulo supera cierto umbral, la latencia no sufre ningún aumento o reducción neto cuando se modifica el intervalo de acoplamiento. La latencia puede modificarse en grado variable a medida que aumenta el período de acoplamiento, pero vuelve al nivel inicial cuando el intervalo de acoplamiento alcanza un período completo. Esta respuesta se denomina reajuste fuerte de secuencia (*derecha*). En el ejemplo que se describe, la latencia disminuye hasta un valor mínimo, luego aumenta hasta un máximo y por fin vuelve a su valor inicial. Los dos comportamientos son topológicamente distintos, como se comprueba si se unen los bordes izquierdo y derecho de cada gráfica para formar un tubo vertical. (Los dos extremos de cada gráfica son equivalentes, dado que el ciclo se repite en cada período.) Los puntos de la gráfica izquierda forman una curva helicoidal continua, en tanto que los de la gráfica derecha dibujan tres anillos distintos.

cribir la cronología de los estímulos. Así, por intervalo de acoplamiento se designa el tiempo que separa el primer latido del momento de aplicación del estímulo. Período de latencia significa el intervalo que separa el estímulo del latido siguiente. Si tras el estímulo se presentan varios latidos, habrá varios tiempos de latencia, que diferirán en un período natural. (Debe tenerse en cuenta que los principios topológicos que estamos repasando se aplican también a otros sistemas biológicos. En este sentido, "latido" no tiene por qué referirse necesariamente al cardíaco. El latido es un simple episodio que marca el comienzo y el final de cada ciclo del sistema.)

Según dure el intervalo de acoplamiento y en razón de la magnitud del estímulo, el latido siguiente se adelantará o se retrasará. Como antes Mines, Eccles abordó el efecto de un estímulo de intensidad constante que se iba retrasando progresivamente a lo largo del ciclo cardíaco. Al modificar de esta suerte el intervalo de acoplamiento, se observa que la relación entre este intervalo y la latencia puede ser de dos tipos. Qué relación se aprecie, dependerá de la magnitud del estímulo.

Uno de esos dos patrones o tipos de respuesta es el denominado reajuste débil de secuencia. Lo entenderemos mejor si atendemos a lo que ocurre cuando un estímulo no muestra suficiente intensidad para modificar el momento de aparición del latido siguiente. En este caso, la suma del intervalo de acoplamiento más el de latencia del primer latido subsiguiente al estímulo será igual al período natural, esto es, al intervalo que separa dos latidos en un sistema no sujeto a perturbaciones. De ahí que el intervalo de acoplamiento y el de latencia tengan que variar en relación inversa: a medida que se retrasa el estímulo, el período de latencia es más breve. Si trazamos una gráfica donde se ponga en relación el período de latencia con respecto al intervalo de acoplamiento, observaremos que todos los latidos se sitúan en una diagonal que desciende hacia la derecha. Al aumentar progresivamente el intervalo de acoplamiento desde cero hasta igualar el período natural, la latencia disminuye también progresivamente en todo el ciclo. Por consiguiente, cualquier período de latencia posible aparecerá una sola vez en la gráfica.

Es característico de esta situación de reajuste débil de secuencia que los valores de la latencia aparezcan un número impar de veces cuando el intervalo

de acoplamientos varía en toda la gama de valores posibles. El patrón de latidos subsiguientes a un estímulo mínimo constituye el caso extremo de un reajuste débil de secuencia. Si se aumenta la magnitud del estímulo, el latido siguiente se adelantará o retrasará según el momento en que se produzca la incitación. Pero si la intensidad del estímulo no supera cierto nivel, la latencia seguirá decreciendo a medida que el intervalo de acoplamiento aumente. En este último caso, los dos parámetros no son inversamente proporcionales, y la gráfica de la latencia se curvará por encima o por debajo de la diagonal, conforme se prolongue el intervalo de acoplamiento. A pesar de lo cual, los valores de latencia siguen apareciendo un número impar de veces.

Al intensificar el estímulo por encima de cierto nivel, asistimos a un segundo tipo de respuesta: un reajuste fuerte de secuencia. Ahora, no aumenta ni disminuye la latencia a medida que el intervalo de acoplamiento crece hasta alcanzar un período completo. La latencia puede aumentar o disminuir cualquier valor cuando se modifica el intervalo de acoplamiento, para volver a su valor inicial en cuanto aquél cubre un período natural entero. Así, por ejemplo, con un intervalo de acoplamiento nulo (lo que significa que el estímulo coincide con el latido espontáneo), el período de latencia puede valer una vez y media el período natural. Aumentemos el intervalo de acoplamiento de suerte que el estímulo se produzca en una posición cada vez más retrasada del ciclo. ¿Qué sucede? La latencia disminuye entonces hasta un mínimo, alcanza luego un máximo y retorna, por último, a sus valores iniciales, conforme el intervalo de acoplamiento se aproxima al período natural. A medida que variamos el intervalo de acoplamiento de un ciclo entero, no irán apareciendo necesariamente todos los períodos de latencia posibles. Más aún, los valores que se observan se presentan dos veces: una en el proceso de ascensión de ésta y, otra, en el de descenso.

La curva descrita constituye sólo un ejemplo de las posibilidades del reajuste fuerte de secuencia. Caben otras curvas que tengan unos trazados muy distintos; aunque todas compartirán un dato: los valores de latencia observados se presentarán un número par de veces. No aparecerán la mayoría de los valores posibles; mas aquellos que lo hagan se darán por duplicado. La gama de los valores de latencia que no aparecen se dilata con la intensidad del estímulo. En el caso extremo de reajuste fuerte de secuencia, sólo hay un valor de latencia. En dicho caso límite, el estímulo actúa con una intensidad tal que el resultado no dependerá ya del momento del ciclo en que se produzca; el latido siguiente siempre ocurre, por ejemplo, medio segundo después del estímulo.

En ambos tipos de reajuste de secuencia, fuerte y débil, el marcapasos recobra su periodicidad normal tras el segundo latido, sea atrasado o esté adelantado. Desde hace bastante tiempo se conocía la respuesta débil. En efecto, la inmensa mayoría de procesos biológicos con periodicidad rítmica manifiestan el reajuste débil de secuencia si el estímulo a que les sometemos es leve. Sin embargo, el reajuste fuerte de secuencia, que es un fenómeno topológicamente distinto, no empezó a describirse en los marcapasos nerviosos hasta hace cinco años. Desde bastante antes se venía recogiendo datos sobre la respuesta fuerte, pero tendría que pasar una década entera para que se reconociera con nitidez el patrón característico. La existencia de reajustes fuertes de secuencia, en los marcapasos neuronales, la han confirmado numerosos investigadores; unos de los últimos, José Jalife y su discípulo Joseph J. Salata, del Hospital Clínico Upstate de la Universidad estatal de Nueva York en Siracusa. Jalife y Salata observaron reajustes fuertes y débiles de secuencia estimulando el nodo senoauricular del conejo y examinando los correspondientes impulsos inmediatos del marcapasos.

Lo veremos más adelante, la capacidad que posee el marcapasos de producir reajustes fuertes de secuencia nos ofrece un eslabón crucial en nuestro razonamiento: un estímulo único y débil puede provocar la fibrilación. El examen detenido de la latencia nos facilitará la comprensión del proceso. Dijimos antes que a cada estímulo le siguen múltiples tiempos de latencia, correspondientes a los latidos de respuesta al estímulo. Desde el punto de vista del análisis topológico conviene sustraer, de cada fase de latencia, los períodos naturales completos que abarca. El esquema donde se plasman los resultados de esta operación nos lleva directamente al planteamiento topológico.

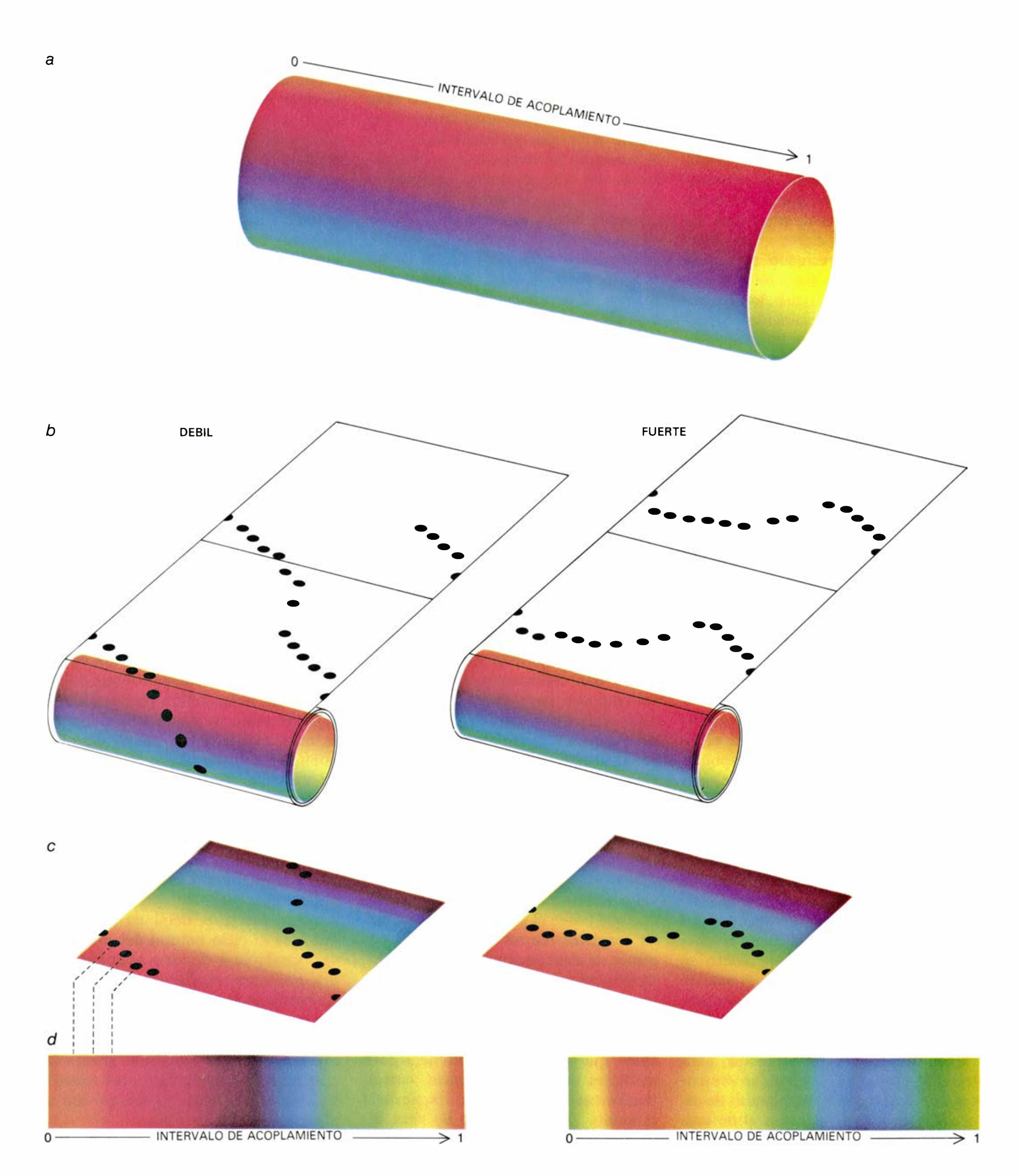
Sea un anillo cuya circunferencia equivalga al período espontáneo del marcapasos. Se señala en el anillo un ciclo completo de colores ordenados de acuerdo con el espectro de la luz. Puesto que la circunferencia equivale, por convención, a la duración del período espontáneo, nos es lícito pensar que cada color corresponde a una fracción determinada del período. Así, el rojo corresponde a un período de latencia brevísimo, el amarillo a un tercio aproximado del período, a dos tercios el azul y, el rojo, de nuevo, a la latencia equivalente a un período natural.

Imaginemos ahora que el período de latencia subsiguiente a un estímulo se represente por una cuerda larga, de un grosor infinitésimo. Un extremo significará el momento de aplicación del estímulo. A corta distancia se sitúa el punto que corresponde al primer latido subsiguiente al estímulo; a continuación se suceden los puntos de los restantes latidos. Pegado al comienzo de la cuerda colocamos el rojo del anillo, a cuyo alrededor se arrolla el resto tantas veces cuantas sea necesario.

¿Qué sale de la composición anterior? Los puntos que representan los latidos provocados por el estímulo se van superponiendo uno sobre otro. Su ubicación en el anillo indica la latencia fundamental, es decir, el tiempo que transcurre entre el estímulo y los latidos subsiguientes, menos el número de períodos completos que pueda sustraerse. Si los puntos caen en la zona roja del anillo, la latencia fundamental es nula, es decir, igual al período espontáneo del sistema. Si caen en la zona amarilla, la latencia fundamental valdrá un tercio, aproximadamente, del período natural. Por corresponder los colores del anillo a fracciones del período natural, se ha asignado a la latencia un color que indica su duración.

Cualquier estímulo que produzca un reajuste fuerte o débil de secuencia desplaza el ciclo natural del marcapasos. Cualquiera de esos estímulos podrá, por tanto, asociarse con una latencia fundamental y con un color del anillo de latencias. Veamos ahora qué ocurre si pasamos los colores que representan las latencias a una gráfica de coordenadas rectangulares que relacione el intervalo de acoplamiento con la intensidad del estímulo.

En el eje de abscisas, base del rectángulo, se anotan los intervalos de acoplamiento, el cero a la izquierda o en el origen y el uno, o la duración del período completo, a la derecha [*véase la figura 6*]. La intensidad del estímulo se representa en el eje de ordenadas, a la izquierda del rectángulo, con el cero en el origen. Los puntos situados a lo largo de la base del rectángulo simbolizan los resultados de aplicar un estímulo mínimo a un período de acoplamiento que

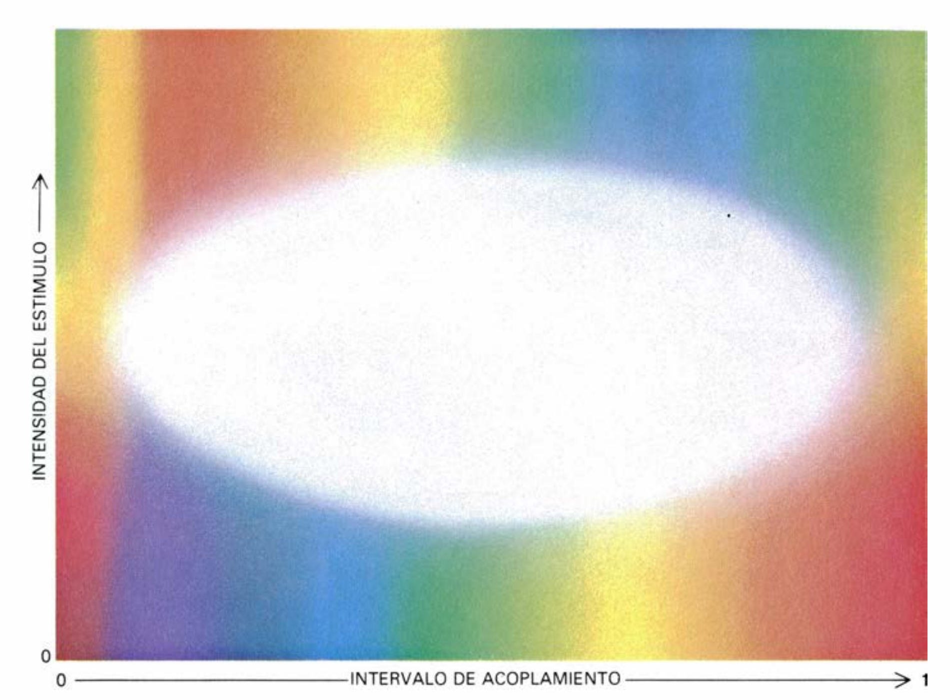


5. ASIGNACION DE COLORES a las latencias mediante un cilindro, o rodillo, provisto de un ciclo completo de colores dispuestos alrededor de su circunferencia y ordenados según el espectro (*a*). La circunferencia del cilindro equivale a un período natural, por lo que cada color corresponde a una fracción de dicho período. El rojo se asigna a un tiempo de latencia nulo, o de un período completo. Se disponen las gráficas de los reajustes débil y fuerte de secuencia de la figura 4 sobre el cilindro, de modo que el extremo inferior de la gráfica (que corresponde al período de latencia nulo) quede en contacto con la banda roja. A continuación se envuelven las gráficas alrededor del cilindro; cada recuadro corresponde exactamente a una vuelta del cilindro (*b*). En los reajustes de secuencia, los latidos sucesivos están separados por un período completo, por lo que, al enrollar las gráficas, se superponen los correspondientes a la misma columna. Este procedimiento suprime los períodos naturales de los tiempos de latencia. Se corta ahora la gráfica por el borde de la banda roja y se desenrolla, aplanándola sobre una superficie; obtenemos una gráfica equivalente a un solo recuadro con una serie de puntos dispuestos en fila (*c*). La fila de puntos representa los períodos de latencia que resultan de aplicar un estímulo a distintos períodos de acoplamiento. Se disponen horizontalmente los colores donde caen los puntos, siguiendo la sucesión de intervalos de acoplamiento (*d*). El espectro de la izquierda corresponde al reajuste débil de secuencia; el de la derecha, al reajuste fuerte. Si el estímulo tuviera una intensidad tan débil que fuera incapaz de modificar el instante de aparición del siguiente latido, la secuencia horizontal de colores empezaría en el rojo y recorrería todo el espectro de colores hasta volver de nuevo al rojo.

va de cero a un período entero. Como indiqué antes, esos estímulos producen latencias cuya duración disminuye a lo largo del período espontáneo. Al asignar, pues, un color a cada punto de la base inferior del rectángulo aparecen todos los colores del espectro.

En la base superior del rectángulo se anotan los puntos que corresponden a la aplicación de estímulos muy intensos con períodos de acoplamiento situados a lo largo del ciclo completo; se satisfacen así las condiciones que requiere un reajuste fuerte de secuencia. Según se vio, este tipo de respuesta provoca una latencia que empieza siendo la mitad de un período normal, decrece hasta un mínimo, aumenta hasta un máximo, para volver al valor inicial. De esta manera, la base superior del gráfico rectangular puede colorearse en una secuencia que empiece a la izquierda por el verde, tenga el naranja, verde y azul en la parte media para tomar el verde a la derecha.

A lo largo de las dos alturas –de la izquierda y la derecha del rectángulo–, los colores representan la aplicación de estímulos cada vez más intensos con un período de acoplamiento nulo (a la izquierda) y otro entero (a la derecha). En principio, podrían desplegarse allí secuencias cromáticas muy dispares, pero carece del mayor interés, desde el punto de vista topológico, cuál sea la disposición de colores que se materialice. Sí importa, en cambio, que la secuencia sea la misma en ambos lados, pues el intervalo de acoplamiento nulo equivale al de un período completo. Los estímulos que se produzcan con esos mismos intervalos habrán de generar, por tanto, el mismo patrón de latencias.



6. GRAFICA RECTANGULAR llenada parcialmente con colores en representación de las latencias. Cada punto de la gráfica corresponde a una combinación precisa de intervalo de acoplamiento e intensidad del estímulo; el color del punto informa de la latencia resultante. El borde inferior del rectángulo muestra una secuencia completa de colores, resultado de la aplicación de un estímulo mínimo con un intervalo de acoplamiento que va de cero a un período completo. Los bordes izquierdo y derecho muestran el efecto de aplicar un estímulo cada vez mayor con un intervalo de acoplamiento de 0 (a la izquierda) o de 1 (a la derecha). El lado superior corresponde a un reajuste fuerte de secuencia. Al recorrer el perímetro del rectángulo se atraviesa una secuencia completa de colores, de rojo a rojo. Empezando por el ángulo inferior izquierdo y siguiendo hacia la derecha, se sigue el ciclo completo de colores por la base de la gráfica. Por el lado derecho se observa una suave progresión del rojo al verde. Arriba, la secuencia va del verde al azul, verde, naranja y de nuevo al verde. Al descender por el lado izquierdo se repite la secuencia del lado derecho, pero en sentido inverso. El perímetro contiene, por consiguiente, un ciclo completo de colores. Siempre que el perímetro contiene un ciclo así, puede inscribirse en algún punto del rectángulo un círculo en el que aparezcan todos los colores una vez y en secuencia ordenada. Un teorema topológico, el de la no-retracción, establece que es imposible asociar todos los puntos del interior del círculo con un punto correspondiente en el perímetro del círculo y al mismo tiempo conservar la contigüidad original de los puntos contenidos en el círculo. Según el teorema, debe existir por lo menos un punto en el interior de la gráfica al que no puede adscribírsele ningún color, es decir, que habrá un punto, correspondiente a un estímulo de intensidad e intervalo de acoplamiento tales, que no puede dar una latencia consistente. Dicho estímulo constituye una singularidad matemática. Su efecto sobre el ritmo es impredecible, pero puede asegurarse que no se limitará al desplazamiento del ciclo del marcapasos.

Ya tenemos coloreados los lados del gráfico rectangular. Continuemos el ejercicio imaginando una rueda parecida al anillo de latencias, con un ciclo completo de colores aplicado a la llanta. Se coloca la rueda en el ángulo inferior izquierdo de la gráfica y se desplaza por todo el perímetro del rectángulo en el sentido de la derecha, discurriendo por la base inferior. En su avance, el color de la rueda se corresponde con el del gráfico.

¿Cuál será el avance neto de la rueda cuando complete el circuito? A lo largo de la base inferior del rectángulo, la rueda cubre un giro entero y recorre las latencias que corresponden a un estímulo insignificante. Al ascender por el lado derecho de la figura, la rueda rota del rojo al verde. Mientras recorre la base superior del rectángulo, la rueda pasa del verde al naranja, a través del azul y verde, para volver de nuevo al verde. Por consiguiente, la rotación neta hacia delante tiene un rendimiento nulo. Desciende ahora por el lado izquierdo del rectángulo: se encuentra con los mismos colores que en la altura derecha, en sentido inverso, por supuesto. Es decir, el efecto producido al subir por el lado derecho se invierte en el proceso de descenso por el izquierdo.

Es manifiesto que la base superior del rectángulo y ambas alturas no contribuyen en nada al giro de la rueda. Su rotación queda cancelada. Cuando la rueda vuelve a la zona roja del ángulo inferior izquierdo, la única participación que no se anula es la aportada por la base inferior del gráfico. Y así, al recorrer el perímetro de la gráfica de latencias, la rueda gira una revolución completa.

¿Qué pasa con los puntos interiores del rectángulo? Alguien supondría que todas las combinaciones posibles de intervalos de acoplamiento e intensidad del estímulo tuvieran su latencia fundamental correspondiente. Y cabría asignar entonces un color para todos los puntos interiores del rectángulo. Todavía más; pudiera esperarse que la latencia se modificara de forma progresiva tras cada cambio que registrara el intervalo de acoplamiento o la intensidad del estímulo, y así los colores del interior del rectángulo fluyeran, suavemente, sin solución de continuidad. Mas no es eso lo que postula la topología: predice que semejante transición cromática es imposible.

El teorema topológico conocido por teorema de la no-retracción demuestra la imposibilidad de confinar enteramente los puntos de la superficie de un disco en el límite de éste, conservando, al propio tiempo, la relación de contigüidad que tenían antes de la retrac-



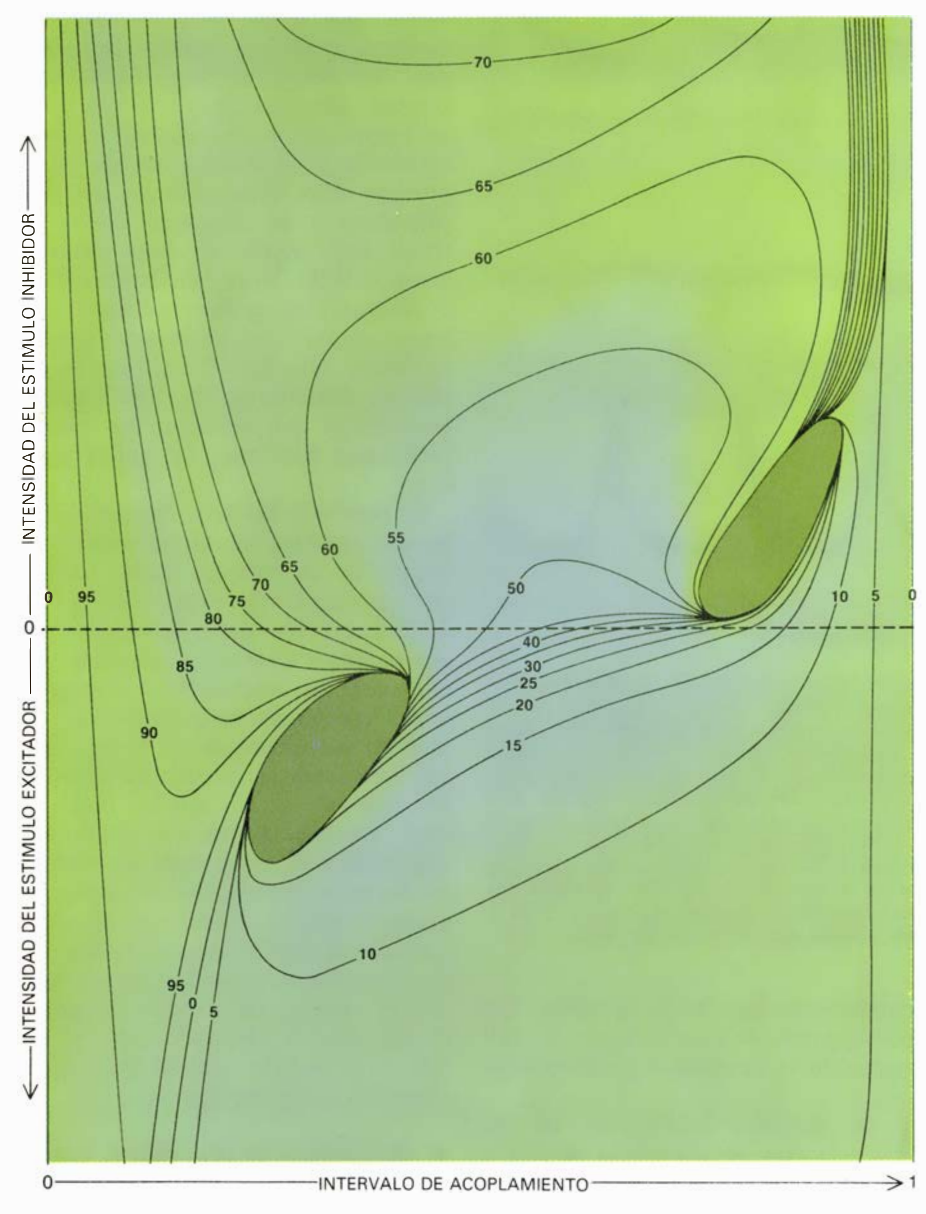
ción. Sólo se mantendrá la contigüidad original cuando un punto, al menos, no se retraiga. Tenemos un ejemplo físico de las implicaciones del teorema de la no-retracción en la película, finísima, de jabón que se forma en un aro. No podemos encogerla hasta el borde del anillo, salvo que la pinchemos. El pinchazo equivale, topológicamente hablando, a la supresión de un punto del disco: es la forma de que los demás puntos encuentren su lugar en los bordes del disco sin perder la contigüidad que mantenían.

Como vimos en el ejemplo de la rueda, el perímetro del rectángulo albergaba un ciclo de colores completo. Algunos de ellos aparecían en más de una ocasión. El verde, por ejemplo, aparece cuatro veces al menos: una en la base inferior y tres más en la superior. Puede demostrarse que, si el perímetro del rectángulo comprende un ciclo completo, se inscribirá en su interior un círculo cuyos colores aparezcan una vez cada uno, y en orden. De acuerdo con el teorema de la no-retracción, resulta imposible que todos los puntos del interior del círculo se confinen en sus bordes sin perder, al propio tiempo, su contigüidad original. Para visualizarlo, imaginemos que todos los puntos interiores del círculo acuden suavemente hacia la circunferencia envolvente; cada punto avanzará hacia el siguiente inmediato. Pero, sea cual fuere la forma que siga el movimiento, habrá siempre algún punto cuyos vecinos se separen y no encuentre sitio en el borde.

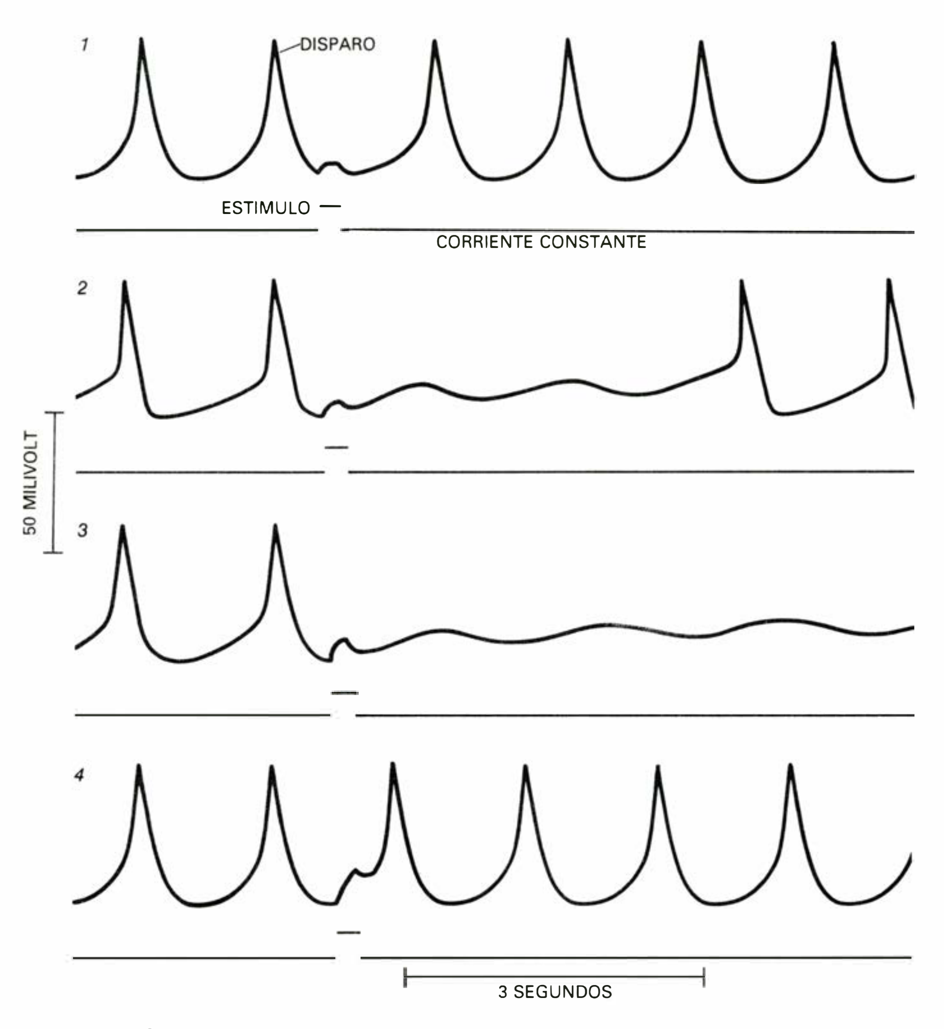
Si queda algún punto interior del círculo que no consiga asociarse a otro de la circunferencia, síguese que habrá algún punto interior del círculo (y, por ende, del rectángulo), que no reciba color. Puesto que todos los puntos del rectángulo representan una determinada combinación de intensidad del estímulo e intervalo de acoplamiento y cada color simboliza una latencia fundamental, debe admitirse, según el teorema de la no-retracción, que hay un estímulo que, aplicado en un momento determinado del ciclo temporal, no da lugar a ninguna latencia fundamental.

El punto del rectángulo que no puede colorearse se denomina punto singular; estímulo singular, la correspondiente combinación de intensidad de estímulo e intervalo de acoplamiento. Tal estímulo no será especialmente intenso, porque cae dentro del rectángulo. La base superior del rectángulo señala los estímulos capaces de producir un reajuste fuerte de secuencia; la base inferior, los que producen un reajuste débil de secuencia. Por consiguiente, el estímulo singular debe tener una intensidad comprendida entre las que poseen los estímulos que producen ambos tipos de respuesta.

El hecho de que un estímulo posea una latencia fundamental consistente, recordemos, significa que es capaz de alterar el ritmo normal del marcapasos sin eliminar la periodicidad espontánea del sistema. El teorema de la no-retracción nos dice que debe haber por lo menos un estímulo que no ejerza este efecto. Cualquiera que sea la respuesta que determina ese estímulo, cabe asegurar que no respetará el ritmo normal del marcapasos. El teorema de la no-retracción no predice cuál será el



7. "AGUJEROS NEGROS" correspondientes a estímulos singulares, esto es, que no van seguidos de una latencia consistente, observados por Eric Best, alumno del autor, en una simulación por ordenador de la descarga de un axón gigante de calamar. Se utilizó un modelo matemático para simular la respuesta del axón a distintos estímulos. Se variaba la intensidad del estímulo y el intervalo de acoplamiento, asignándose distintos colores a los períodos de latencia resultantes. El axón del calamar es sensible tanto a los estímulos inhibidores como a los excitadores, de manera que la estimulación produjo dos rectángulos como el que aparece en la figura 6. Los dos rectángulos pueden unirse a lo largo de la línea que representa el estímulo de intensidad nula. De la operación resulta la imagen que se muestra a la izquierda. La zona negra corresponde a los estímulos que no van seguidos de la recuperación de la respuesta rítmica espontánea. Alrededor de las zonas negras se dibuja una secuencia completa de colores, de acuerdo con la duración de la latencia. Los colores fluyen ordenadamente de un área negra a la otra, la unión de los puntos de la gráfica que tienen el mismo período de latencia da una serie de líneas, semejantes a las de los mapas topográficos. Los contornos correspondientes a la estimulación del axón del calamar se muestran en la gráfica superior. En este caso, puesto que representan latencias, se denominan isocronas. El número de las isocronas es un porcentaje del período natural. La topología de la gráfica de color no se modificaría si se extendiera sobre una región del corazón. En ese caso, las isocronas representarían los períodos de latencia de las células de la región correspondiente, es decir, el intervalo que tardarían en disparar.



8. ESTIMULOS SINGULARES en tejido del marcapasos cardíaco, cuya existencia demostraron Jalife y Charles Antzelevitch, del Laboratorio Masón de Investigación Médica. Trabajaron con fibras de Purkinje de corazón de perro. En cada sección, el trazo superior representa el potencial eléctrico de las fibras musculares y, los picos, el momento del disparo. La línea inferior representan la pequeña corriente continua aplicada a las fibras para que se activaran periódicamente. El segmento elevado del trazado inferior señala la aplicación de un pequeño estímulo adicional de 200 milisegundos de duración. Si el estímulo se aplica inmediatamente después del latido, el único efecto que produce es un ligero retraso del latido siguiente (*1*). Si se estimula un poco más tarde, la fibra interrumpe su actividad, pero recupera luego su ritmo espontáneo (*2*). Si el estímulo llega más tarde, la descarga espontánea se interrumpe por completo (*3*). El instante en que un estímulo puede producir ese efecto se denomina fase vulnerable. Los estímulos de intensidad adecuada que se aplican en la fase vulnerable corresponden a la región negra de la figura 7. Si el estímulo se produce tras la fase vulnerable, el latido siguiente se adelanta ligeramente (*4*).

resultado de la aplicación de ese estímulo a un sistema fisiológico. Los latidos posteriores pueden faltar o aparecer de manera imprevisible. La combinación precisa de intervalo de acoplamiento e intensidad del estímulo que es capaz de producir dicho resultado constituye una singularidad matemática: un "agujero" en la secuencia temporal.

Conviene tener en cuenta que el hallazgo de la singularidad depende de la existencia de reajustes fuertes de secuencia importantes. Si el marcapasos sólo mostrara reajustes débiles de secuencia, los colores de la base superior del rectángulo recorrerían un ciclo completo, como los de la base inferior. En el ejemplo de la rueda, el avance por la base superior cancelaría el adelanto de la inferior, y no se produciría movimiento neto hacia adelante. Por consiguiente, no habría lugar a la aplicación del teorema de la no-retracción.

Los patrones topológicos de los reajustes de secuencias fuertes y débiles se aplican en sistemas simples y también en otros complejos, como el corazón humano. Para comprobar la existencia de una tal singularidad en un sistema fisiológico, mi alumno Eric Best utilizó un ordenador donde simular la actividad de un sistema muy sencillo capaz de latir periódicamente: una sola célula nerviosa. El modelo utilizaba una serie de ecuaciones diferenciales formuladas por Alan L. Hodgkin, de la Universidad de Cambridge, y Andrew F. Huxley, del University College de Londres, para describir la propagación de los potenciales de acción a lo largo del axón gigante del calamar (una fibra nerviosa larguísima). Best empleó las ecuaciones de Hodkin y Huxley para construir un modelo de descarga rítmica del axón. Simuló la aplicación de una serie de estímulos mientras variaba el intervalo de acoplamiento y registró las latencias resultantes.

El axón gigante del calamar es sensible a los estímulos de excitación e inhibición, por lo que se obtuvieron dos rectángulos del tipo descrito antes, uno para cada tipo de estímulo. Ambos rectángulos pueden unirse a lo largo del eje horizontal que corresponde a los estímulos de intensidad mínima. Se incorporaron a los rectángulos las latencias calculadas y se dibujaron líneas de unión entre puntos de igual latencia, como si de las líneas de idéntica altitud en un mapa topográfico se tratara. Las líneas que representan latencias iguales se llaman isocronas. Dibujadas las isocronas, pintaron las áreas delimitadas con colores que indicaban las correspondientes fracciones del período natural.

El resultado fue muy llamativo. En los dos rectángulos, las isocronas convergían en un "agujero negro", es decir, una singularidad sin latencia definida. Desde el perímetro del agujero negro irradiaba un ciclo completo de isocronas, lo que interesaba sobremanera para el problema de la fibrilación. Al unir los dos rectángulos a lo largo del eje horizontal, las isocronas fluían ordenadamente de un agujero negro al otro. Aunque el teorema de la no-retracción sólo garantizaba la existencia de un punto singular, los agujeros negros ocupaban un área considerable. La razón de ello era que las condiciones de la simulación se ajustaron para facilitar el hallazgo de un punto singular. Como veremos, las condiciones que se dan en el corazón también facilitan la extensión de la singularidad.

Los hallazgos de Eric Best se confirmaron en sistemas biológicos reales por otros investigadores, como John M. Rinzel, del Instituto Nacional de Artritis, Metabolismo y Enfermedades Digestivas de los Estados Unidos, y Rita Guttman, del Laboratorio de Biología Marina de Woods Hole, quienes encontraron singularidades, inhibidoras y excitadoras, en el axón gigante del calamar. Jalife y Charles Antzelevitch, del Laboratorio Masón de Investigación Médica, encontraron singularidades inhibidoras y excitadoras capaces de interrumpir la descarga espontánea de las

fibras de Purkinje del perro y del nodo senoauricular del gato.

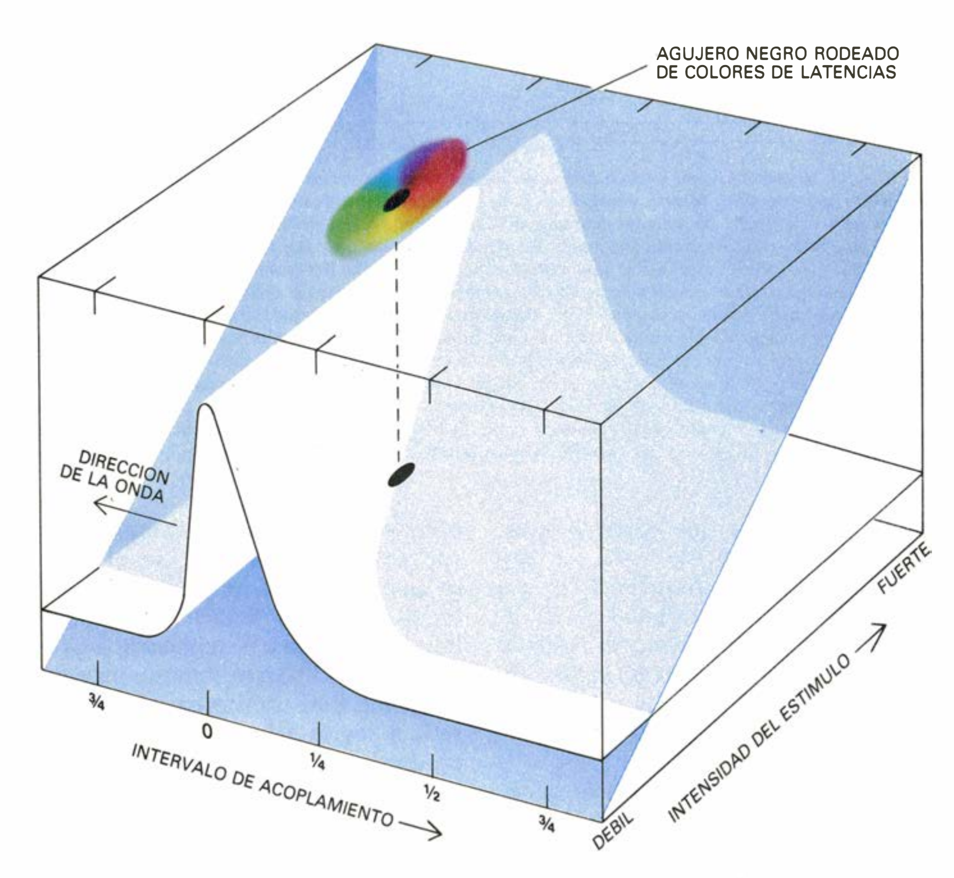
Parece, pues, que puede eliminarse la periodicidad de cualquier marcapasos capaz de producir reajustes de secuencia fuertes y débiles con un estímulo breve aplicado en el momento oportuno y con la intensidad adecuada. La contracción del corazón humano, sin embargo, se distribuye espacialmente; las arritmias, o alteraciones de su ritmo normal, suelen presentarse en forma de ondas rotatorias, y no como un desajuste impredecible de la secuencia temporal o una incapacidad de disparo. La fibrilación, en particular, puede considerarse una desorganización espacial del proceso de contracción normal. ¿Contribuye ese fascinante descubrimiento de los puntos de singularidad topológica al esclarecimiento de la causa de la fibrilación?

Existe una relación evidente entre las singularidades y las ondas rotatorias; mas, para comprenderla, necesitamos conocer cómo se propagan las ondas de impulsos eléctricos en el corazón. En el músculo cardíaco, los estímulos electroquímicos que inician la contracción se propagan sin atenuarse. Todas las fibras recuperan el estímulo que les llega antes de transmitirlo a la célula vecina. Si pudiera derivarse a un circuito, la señal se propagaría indefinidamente alrededor del mismo. Este fenómeno se conoce en terminología clínica con el nombre de re-entrada.

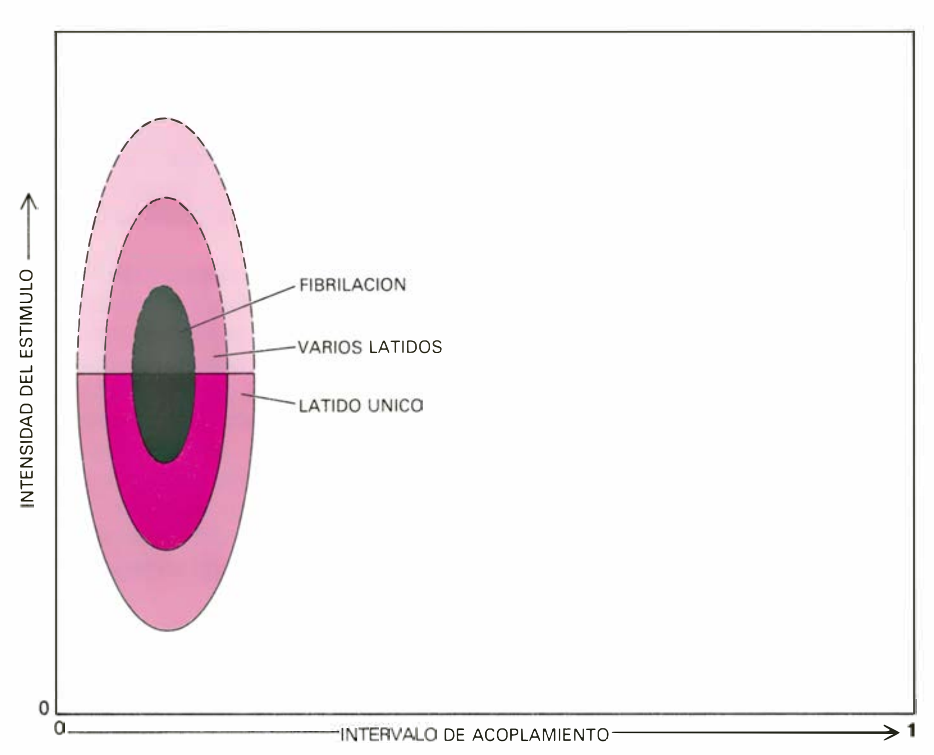
Sólo puede establecerse la circulación ininterrumpida de una onda de actividad eléctrica en el corazón si la excesiva longitud del circuito impide que sea recorrido en el período refractario que sigue al potencial de acción. Si el período de la onda fuera más corto que el período refractario, desaparecía en la primera vuelta al circuito, porque alcanzaría a fibras que estarían aún en el período refractario. Sabemos actualmente que en el corazón pueden producirse ese tipo de ondas. De hecho, se ha demostrado que, bajo diversas formas de arritmias, subyace la circulación de ondas alrededor de la desembocadura de los vasos o de zonas de fibras muertas.

Se creía que estas ondas no podían desplazarse por un tejido sin perforaciones o agujeros: se cancelarían rápidamente al propagarse a través del tejido situado en el centro de la trayectoria circular. Estudios recientes de simulación de actividad cardíaca, realizados con ayuda de ordenadores, han demostrado, sin embargo, que pueden producirse ondas rotatorias incluso en el seno de un tejido sin solución de continuidad, como lo es el músculo ventricular sano. Gordon K. Moe, del Laboratorio Masón de Investigación Médica, J. A. Abildskov, del Hospital Clínico de la Universidad de Utah en Salt Lake City, y Werner C. Rheinboldt, de la Universidad de Maryland en College Park, fueron los primeros en simular un medio excitable, como el músculo cardíaco, y demostrar la existencia de ondas rotatorias. V. I. Krinskii, del Instituto de Biofísica de la Académica de Ciencias de la Unión Soviética, y sus colegas, ha demostrado que la onda de un movimiento circular puede multiplicarse, fragmentarse y extenderse si el tejido contiene zonas no homogéneas como las que se producen con frecuencia cuando se bloquea la llegada de sangre al músculo cardíaco. Estas ondas, o rotores, pueden circular más rápidamente y en un espacio mucho más reducido de lo que se creía. Este trabajo constituye el modelo teórico más perfecto de la fibrilación.

Allessie y sus colegas Felix I. M. Bonke y F. J. G. Schopman observaron rotores reales en el tejido cardíaco. Los investigadores holandeses indujero una onda que realizaba unas 10 vueltas por segundo a través de un fragmento de tejido de conejo sin perforaciones. Utilizaron un sistema de electrodos móviles para registrar los impulsos. Se representó la posición del frente de onda como una secuencia de contornos iso-



9. HIPOTESIS DEL AUTOR sobre el mecanismo de la fibrilación ventricular. Supone la existencia de dos gradientes: uno de intensidad del estímulo y otro del momento de su aparición. La superposición, en sentido transversal, de los gradientes da lugar a una singularidad matemática. La ilustración muestra, en forma esquemática, una pequeña zona rectangular del miocardio. La onda, que atraviesa el tejido de derecha a izquierda, es un impulso procedente del marcapasos cardíaco. Las fibras miocárdicas se activan a medida que avanza el estímulo. Las fibras situadas a la izquierda del pico se activaron en el período precedente y están a punto de disparar de nuevo. Las situadas en el pico son las que están en pleno disparo; las situadas inmediatamente a su derecha acaban de activarse. En la parte anterior del rectángulo, por tanto, están representados todos los intervalos de acoplamiento comprendidos entre cero y un período completo. Uno de los nervios que modulan la acción del corazón distribuye sus terminaciones de forma especialmente densa en la parte posterior del rectángulo. Las terminaciones escasean a medida que nos acercamos a la parte frontal. En consecuencia, los estímulos nerviosos serán más intensos en la parte posterior del rectángulo, intensidad que disminuirá conforme se acerquen a la parte anterior (*plano inclinado*). Podemos reconocer, pues, en el rectángulo de tejido, la disposición de la gráfica de latencias que relaciona la intensidad de los estímulos con el intervalo de acoplamiento. Se deduce de ello que en algún punto del rectángulo existe un estímulo de intensidad e intervalo de acoplamiento tales que es incapaz de generar una latencia consistente. Desde esa singularidad irradia una secuencia completa de isocronas. Cuando un estímulo nervioso alcanza el rectángulo, las fibras que rodean la singularidad se activan siguiendo el orden de sus latencias, que corresponde a la secuencia de las isocronas. Esta situación es idónea para iniciar el movimiento rotatorio, que, por expansión, genera la arritmia fibrilante.



10. DIANA de estímulos que pueden provocar fibrilación en corazones intactos. La parte superior del gráfico se basa en datos clínicos cualitativos y, la inferior, se ha obtenido con el soporte adicional de información procedente de trabajos con animales. En el anillo más externo se sitúan los estímulos que producen una extrasístole (latido adicional). En el anillo intermedio se incluyen los estímulos que producen varios latidos adicionales y, en el anillo interior, los que provocan fibrilación. El razonamiento topológico expuesto garantiza la existencia de una sola combinación de intensidad del estímulo e intervalo de acoplamiento capaz de iniciar el movimiento rotatorio en un punto determinado del corazón. En el corazón real, sin embargo, existen en todo momento inhomogeneidades en el sincronismo y en la intensidad de los estímulos, que amplían el margen de los estímulos capaces de originar el movimiento rotatorio. El estímulo aplicado puede ser excesivo en un punto determinado, pero resultar apropiado en otro vecino. Lo mismo ocurre con el instante de aplicación del estímulo, que si no es el apropiado en una zona puede serlo para la vecina. El centro de la diana recoge las distintas combinaciones de intensidad e intervalo de acoplamiento que pueden originar el movimiento rotatorio de activación en el corazón humano intacto.

cronos. A medida que giraba la onda, el extremo interior de cada isocrona describía un bucle irregular de menos de un centímetro de diámetro. M. J. Janse y F. J. van Capelle, del Hospital de la Universidad de Amsterdam, obtuvieron mapas isocronos semejantes en la fibrilación ventricular.

Repitamos que el teorema de la no-retracción no predice qué tipo de arritmia produce el estímulo de una región singular. Sólo postula que tal estímulo existe. El poder predictivo del argumento topológico es, por consiguiente, muy limitado. Por otra parte, los principios topológicos se prestan a una interpretación más generalizada que la que se ha empleado aquí. Los principios de la cronología de los estímulos del marcapasos que se han mencionado podrían aplicarse a un sistema de configuración espacial lo mismo que a una masa contráctil única. Los contornos isocronos de las representaciones rectangulares podrían aplicarse a un sistema tridimensional cartografiándolos en una región determinada de tejido. Se corresponderían entonces con la actividad eléctrica distribuida por el tejido en un momento dado, y no con la suma de los resultados de la estimulación de una fibra aislada o de un marcapasos en una serie de ensayos durante un lapso temporal. Esta transformación no alteraría la lógica del argumento topológico. Los puntos de la gráfica seguirían representando una determinada combinación de intensidad del estímulo y de intervalo de acoplamiento, pero el punto también representaría una posición definida en el sistema. El color simbolizaría la latencia del punto correspondiente. Supongamos, además, que el efecto del "reajuste de secuencia" de distribución espacial es parecido al del axón del calamar según lo describen las ecuaciones de Hodgkin-Huxley y comprobó Best. El aspecto crucial de la semejanza se cifraría en la existencia de un ciclo completo de isocronas alrededor de cada singularidad, es decir, un "arco iris" de colores rodeando el agujero negro.

¿Cómo se formaría tal arco iris en la superficie del corazón y cuáles serían sus consecuencias? Imaginemos un pequeño fragmento rectangular de la pared muscular del ventrículo atravesada continuamente por sucesivas ondas de activación que proceden del marcapasos normal. Supongamos, arbitrariamente, que el frente de onda se desplaza de derecha a izquierda y que la longitud del rectángulo se aproxime a la longitud de onda del impulso. En el rectángulo habrá un solo pico de onda, que corresponderá a las fibras que están disparando. Las fibras situadas ligeramente a la izquierda del pico corresponden a las que se activaron casi un ciclo completo antes y están a punto de hacerlo de nuevo; las que quedan justo a la derecha acaban de descargar. Más a la derecha están las fibras que se activaron anteriormente. De esta manera, en la parte frontal del rectángulo aparecen todos los intervalos de acoplamiento posibles, de cero a un ciclo natural completo.

Por todo el tejido se aprecian terminaciones nerviosas procedentes de ramales nerviosos principales; la distribución, sin embargo, no es uniforme. La intensidad del estímulo nervioso es proporcional a la densidad de las terminaciones. Supongamos que la región situada en la parte posterior del rectángulo tiene una densidad mayor de terminaciones nerviosas que la región frontal. El estímulo nervioso, por consiguiente, disminuirá de intensidad de la parte posterior a la frontal.

Cuando un estímulo nervioso entre en el rectángulo, el gradiente de su intensidad tendrá una orientación transversal a la del gradiente de los intervalos de acoplamiento a lo largo del recorrido de la onda de excitación procedente del marcapasos. Dispuestas así las cosas, vemos que es posible superponer sobre el rectángulo de músculo cardíaco la gráfica del intervalo de acoplamiento y de intensidad del estímulo. Si se satisfacen estas condiciones, en algún punto del bloque de tejido muscular debe existir un agujero negro, es decir, un punto donde la aplicación de un estímulo con un intervalo de acoplamiento definido no genera una latencia bien definida.

Si, como hemos previsto en nuestra hipótesis, el efecto de reajuste de la secuencia del corazón es similar al del axón del calamar, alrededor del agujero negro aparecerá un espectro de colores isocronos que corresponde a una secuencia completa de latencias. Las isocronas corresponden a las fibras cardíacas que se activan simultáneamente en respuesta al estímulo nervioso. El estí-

mulo despierta así una onda de activación rotatoria alrededor del punto que representa la singularidad.

Este espectro de colores isocronos se limita a una zona de un centímetro cuadrado, aproximadamente, que corresponde al área ocupada por los rotores observados en el tejido cardíaco. Es difícil imaginar otra situación más idónea para iniciar una onda rotatoria que el agujero negro rodeado por un espectro de latencias. Además, si el tejido cardíaco no es homogéneo, el movimiento circular puede dar origen a numerosos frentes de onda rotatorios. Así, el movimiento rotatorio generado por el reajuste de secuencia de una singularidad podría, en última instancia, transformarse en la catastrófica fibrilación.

Los gradientes temporales y de intensidad del estímulo que existen con profusión en el corazón humano pueden facilitar el comienzo de la fibrilación. Veamos por qué. El argumento topológico sólo garantiza que existe un punto singular caracterizado por una combinación única de intervalo de acoplamiento e intensidad del estímulo. Si el corazón humano estuviera formado por un tejido ideal, donde los estímulos se transmitieran instantáneamente y todas las fibras se contrajeran al unísono, la fibrilación sólo podría producirse al aplicar un estímulo de características perfectamente definidas. El agujero negro sería un punto infinitesimal.

El corazón de un mamífero superior, como el hombre, no es ese órgano ideal. Como hemos visto, la intensidad y el momento de aparición de los estímulos varían notablemente incluso en puntos cercanos; por consiguiente, son muchas las combinaciones de intensidad y momento de aplicación del estímulo que pueden desencadenar los movimientos rotatorios. Por ejemplo, un estímulo cuya intensidad sea excesiva para generar un rotor en un punto dado quizá sea idóneo para provocarlo en una zona vecina. Lo mismo ocurre con el momento de aplicación del estímulo.

Imaginemos, otra vez, una gráfica con el intervalo de acoplamiento en abscisas y la intensidad del estímulo en ordenadas; representemos los estímulos desencadenantes de la fibrilación. Si el corazón estuviera formado por un tejido uniforme sólo existiría un punto. En el corazón real, el punto crece notablemente, por lo que es más fácil dar con él. Los estudios con animales han confirmado que existe realmente una zona considerable de puntos que pueden generar fibrilación. Los estímulos situados fuera de la zona no la producen. Se ha comprobado este principio en casos de electrocución accidental y se ha utilizado en cirugía extracorpórea para interrumpir los latidos cardíacos.

En su último trabajo, George Mines hizo tres generalizaciones sobre la fibrilación ventricular que ha confirmado la experiencia clínica. En primer lugar, la fibrilación puede provocarse descargando un estímulo eléctrico durante la fase vulnerable. En segundo lugar, la fibrilación provoca la reentrada de impulsos rotatorios. En tercer lugar, la fibrilación está favorecida por la falta de homogeneidad espacial de los tejidos o de los estímulos procedentes de las terminaciones nerviosas que inervan el tejido miocárdico. El razonamiento topológico que hemos expuesto permite relacionar estas tres generalizaciones empíricas.

Hasta aquí nos llevan las observaciones clínicas y la topología. Si el mecanismo topológico propuesto es correcto, las implicaciones clínicas son bastante pesimistas, ya que el corazón se halla continuamente bombardeado por estímulos eléctricos de distinto origen. No puede excluirse que dichos impactos den lugar a una singularidad, a menos que suprimamos la capacidad de producir reajustes intensos de secuencia de las membranas del marcapasos. Si ello no fuera posible, ni deseable, el objetivo de la medicina preventiva debería centrarse en reducir el tamaño de los agujeros negros y hacerlos lo más inaccesibles que sea posible.

Algunas preguntas sugeridas por el análisis topológico, que quedan aún sin respuesta, pueden conducirnos a resultados clínicos de gran interés. Parece que todos los corazones humanos están sometidos a un bombardeo de estímulos eléctricos; son pocos, en cambio, los que padecen fibrilación. ¿Cuáles son, pues, las circunstancias que explican que el reajuste de una singularidad genere un movimiento rotatorio? ¿Por qué un rotor forma unas veces multiples ondas que se dispersan, y otras simplemente muere, dando paso a una actividad sincronizada? ¿Pueden identificarse las condiciones necesarias para que una singularidd entre en fibrilación, y, mediante la administración de medicamentos que modifiquen las propiedades eléctricas del músculo cardíaco, controlarlas? Estos temas han preocupado a los cardiólogos desde hace tiempo. Quizá la topología, al centrar la atención en un contexto matemático, contribuya significativamente al control de la muerte cardíaca súbita.

Temas metamágicos

Torneos computarizados del Dilema del Preso que sugieren cómo evoluciona la conducta cooperativa

Douglas R. Hofstadter

La vida está repleta de paradojas y dilemas. A veces nos parece incluso como si la esencia misma del vivir fuese la percepción –más todavía, la degustación– de paradojas. Aunque todas las paradojas manifiestan compartir una raíz común, algunas son de apariencia muy abstracta y filosófica, mientras otras tocan la vida muy de cerca. Una de las paradojas que mucho nos la recuerda es el llamado Dilema del Detenido, que fue descubierto hacia 1950 por Merrill M. Flood y Melvin Dresher y, más tarde, formalizado por Albert W. Tucker. Presentaré primero la paradoja en forma metafórica y después como problema formalizado.

Según mi experiencia, a los no iniciados, la formulación original, con dos detenidos, les resulta menos clara que la siguiente. Supongámonos poseedores de gran cantidad de algo (dinero, por ejemplo) y supongamos que nos haga falta obtener ciertas cantidades de otras cosas (sellos de correos, comestibles, diamantes...). Llegamos a un acuerdo mutuamente aceptable con el único proveedor de tales bienes que conocemos. Ambos nos consideramos satisfechos con las cantidades que vamos a dar y recibir. Empero, por una razón cualquiera, el intercambio debe producirse en secreto. Acordamos, pues, dejar nuestros bienes en un saco en un lugar convenido del bosque, y recoger el saco del otro en otro lugar por él designado. Supongamos que haya quedado claro, tanto para nosotros como para la otra parte, que nunca más volveremos a encontrarnos ni a tener en el futuro nuevos tratos.

Evidentemente, uno y otro tenemos el mismo temor, a saber, que el otro nos deje tan sólo un saco vacío. Si ambas partes cumplimos lo convenido, ambas nos daremos por satisfechas. Pero resulta igualmente obvio que aún sería más satisfactorio lograr algo a cambio de nada. Nos sentimos, por tanto, tentados a dejar una bolsa vacía. Y podríamos razonar –aparentemente con rigor– de esta forma: "Si el otro me trae una bolsa llena, haré yo mejor negocio dejando la mía vacía, pues habré conseguido lo que deseaba sin perder yo nada. Y si el otro me deja una bolsa vacía, también me habrá convenido más dejar la mía vacía, pues no habré sido estafado. Nada habré ganado, pero nada habré perdido. Parece pues, que *independientemente de lo que el otro contratante pueda o no hacer* saldré ganando si dejo mi saco vacío. Y esto será lo que haga".

Mientras, nuestro proveedor está embarcado más o menos en los mismos pensamientos, y llega paralelamente a la conclusión de que más le vale dejar una bolsa vacía. Y así, ambos, con lógica impecable (al menos aparentemente) dejamos cada uno sacos vacíos para el otro, y salimos de la operación con las manos igualmente vacías. Lo cual es triste, porque si hubiésemos cooperado, ambos hubiésemos ganado algo que deseábamos tener. ¿Es que, acaso, la lógica impide la cooperación? Este es el tema que suscita la paradoja del preso.

En el caso de que esté Vd. preguntándose por qué se llama así, veamos la razón. Imagine que usted y otro cómplice (otra persona hacia la cual no alberga usted sentimientos ni a favor ni en contra) hayan cometido un delito; ambos han sido detenidos y se encuentran encarcelados, esperando amedrentados el juicio. Se encuentran encerrados en celdas distintas, y carecen de medio alguno para comunicarse. El fiscal les propone a cada uno de ustedes un pacto (y le explica a cada uno que tal pacto le ha sido también ofrecido al otro, y que ambos lo conocen), a saber: "Tenemos muchas pruebas circunstanciales en contra de ustedes dos. De forma que, si ambos se declaran inocentes, de una u otra forma conseguiremos una sentencia condenatoria, y cada uno de ustedes se pasará un par de años en la cárcel. Ahora, si nos ayudase usted, admitiendo su culpabilidad y facilitándonos lograr la condena de su cómplice –discúlpeme, de su presunto cómplice– podríamos conseguir que usted quedase en libertad. Y no tema una venganza, porque su cómplice estaría recluido cinco años. ¿Qué le parece?". Cauteloso, usted inquiere: "Pero, ¿y si ambos nos declarásemos culpables?". "Ah, bueno, amigo mío, en tal caso ambos serían condenados a cuatro años de prisión."

Qué duda cabe, estamos en un aprieto. Si nuestro cómplice se ha declarado culpable no nos conviene declararnos inocentes, porque seguramente tendremos que pasar cinco largos años de reclusión. Sería mejor que ambos confesásemos; la condena sería entonces de sólo cuatro. Por otra parte, si nuestro "socio" se afirma inocente, entonces lo que más nos conviene es confesar, ya que entonces saldríamos "de rositas". Así pues, parece inicialmente claro lo que nos conviene hacer: cantar. Pero claro, lo que a nosotros nos parece obvio se lo es igualmente a nuestro socio; parece que a ambos nos convendría cantar... ¡y eso significa cuatro años en Ocaña! Al menos, tal parece decirnos la lógica. Es curioso, porque si ambos fuéramos ilógicos y mantuviéramos la boca cerrada, tan sólo tendríamos que estar encerrados dos años cada uno. ¡Cuidado! ¡La lógica ataca de nuevo!

Retornemos a la metáfora de partida, aunque retocando ligeramente su planteamiento. Tanto su proveedor como usted desean imperiosamente disponer de un suministro regular de lo que el otro tiene para ofertar, y así, antes de llevar a efecto el primer toma y daca se acuerda efectuar un intercambio regular, mensual, durante toda la vida. Ninguno de ustedes espera jamás encontrarse frente a frente con el otro. Más todavía, ni siquiera tiene idea de si es joven o viejo, de manera que no puede saberse cuánto durará este compromiso "de por vida", si bien parece razonable suponer que durará al menos unos meses, y verosímilmente años.

Bien, ¿qué deberemos hacer en nuestro primer trueque? Dejar un saco vacío ya la primera vez parece no ser muy buena política con que iniciar una relación; malamente podrá así llegarse a la recíproca confianza. Supongamos que usted aporte una bolsa llena, y que otro tanto haga la otra parte. Todo es felicidad –durante un mes. Transcurrido, es preciso para ambas partes volver a empezar. ¿Estará esta vez el saco lleno o vacío? Cada mes tiene cada uno de ustedes que decidir si dejará "colgado" al otro, o si va a "cooperar" (llevar un saco lleno). Imaginemos que un mes, inesperadamente, su proveedor le falla.

¿Qué debe usted hacer entonces? ¿Decidir que ya no es posible seguir confiando en él, y que en lo sucesivo será usted quien deje el saco vacío, lo que equivale a romper el trato? ¿Fingirá usted no haberse dado cuenta, y seguirá mostrando una conducta amigable? ¿Tal vez procurará usted castigar al proveedor con cierto número de defecciones por su parte? ¿Una? ¿Dos? ¿Un número aleatorio? ¿Un número creciente, dependiente de cuantas veces haya sido usted defraudado? ¿Hasta qué punto podrá llegar la locura de ambas partes?

El problema que acabamos de plantear es el Dilema del Detenido, iterado. Es un problema muy difícil. Podemos darle carácter más cuantitativo, y en esa forma estudiarlo mediante los métodos de la teoría de juegos y la simulación por ordenador. ¿Cómo podremos cuantificarlo? Construyendo una "matriz de pagos" que valore en puntos cada una de las diversas alternativas. Vemos una matriz de pagos típica en la figura 1.

En esta matriz, la mutua cooperación le vale dos puntos a cada parte (tal podría ser el valor subjetivo de obtener un saco lleno de lo que deseamos y ceder un saco de lo que disponemos). La mutua defraudación vale a cada parte cero puntos (valor subjetivo de ganar y perder nada). Cooperar cuando nuestro proveedor nos tima apesta: nosotros recibimos -1, mientras el muy bandido se lleva 4 puntos. ¿Por qué tantos? Por lo muy placentero que es recibir algo a cambio de nada. Y evidentemente, si es *usted* el que un mes hace de rata, justamente cuando su proveedor se ha mostrado cooperante, usted se anota 4 puntos y, él, -1.

Es obvio que en sentido colectivo lo mejor para ambos sería cooperar siempre. Pero estamos suponiendo, que usted no tiene consideración alguna hacia la otra persona. No existe aquí un "bien común" por el que estén uno y otro trabajando; no, ambos son el colmo del egoísmo. ¿Y entonces qué? Quizá convenga aclarar el significado de "egoísta" como sigue: imaginemos que usted y su proveedor hayan llegado con los años a establecer una relación mutuamente cooperativa. Un día recibe usted información secreta y digna de confianza de que el proveedor está muy enfermo y va a morir pronto, seguramente en el plazo de uno o dos meses. El proveedor no tiene motivo para pensar que usted pueda estar al tanto de ello. ¿No siente usted fuerte tentación de defraudarle inesperadamente, a pesar de los años de mutua cooperación? Después de todo, tiene usted que velar por sí mismo, y por nadie más, en este mundo cruel. Y puesto que parece que éste puede ser el último mes de vida de su proveedor, ¿por qué no sacar el máximo provecho de la información secreta de que disponemos? Su estafa seguramente no será castigada o, en el peor de los casos, lo será por un único fallo del moribundo proveedor.

Cuanto más seguro esté usted de que la próxima vez será la última, tanto más fuerte es la convicción de que debe defraudar. Cada uno de ustedes, evidentemente, tendría tal convicción al saber que se le está acabando la cuerda. Esto es lo que queremos expresar al decir "conducta egoísta". Significa que no hay sentimientos de amistad, buena voluntad o compasión por el otro jugador; no hay conciencia, todo cuanto interesa es acumular puntos, y cuantos más, mejor.

¿Qué aspecto tendría la matriz de pagos para la otra metáfora, la de los presos? Bien, podemos verla en la figura 2.

La equivalencia entre esta matriz y la precedente salta a la vista, sin más que sumar a todos los términos de ésta la constante 4. Más aún, podríamos sumar una constante cualquiera a una u otra matriz, y el problema permanecerá esencialmente invariable. Sumemos por tanto 5 a ésta, para librarnos de todos los "pagos" negativos. En la figura 3 se nos ofrece la "matriz canónica" de pagos correspondientes al dilema del preso.

El número 3 denota la "recompensa por mutua cooperación", que abreviaremos R. El número 1 es la "penalización", o P. El número 5 es T, la "tentación", y 0 es S, el "pago del simple". Las condiciones causantes de que la matriz represente una situación del tipo "dilema del preso" son éstas:

$$(1) \qquad T > R > P > S$$

$$(2) \qquad \frac{T + S}{2} < R$$

La primera condición se encarga de inducir a cada parte a pensar "lo que más me conviene es defraudar, independientemente de lo que el otro haga". La segunda garantiza que, si ambas partes entran en un sistema repetitivo de alternancias desfasadas (es decir, "usted coopere, yo defraudaré", un mes; "defraude usted, que yo cooperaré", al siguiente), nadie saldrá ganando –en realidad, ambos perderán– con respecto a la cooperación regular.

Bueno, ¿y cuál será nuestra estrategia óptima? Es muy fácil demostrar que no puede haber una solución universal. Es decir, que no existe una estrategia que sea superior en todas las circunstancias a todas las estrategias restantes. Tomemos el caso en que el jugador adopte la estrategia SIEMPRE D, consistente en defraudar en todas las rondas. En tal caso, lo mejor que podemos hacer es defraudar también nosotros en todas las jugadas, incluida la primera. Por otra parte, supongamos que el otro bando esté aplicando la estrategia de Represalia Masiva, que significa: "Estoy dispuesto a colaborar hasta ser defraudado por primera vez; a partir de ahí seré yo quien defraude siempre". En tal caso, si usted incumple con la otra parte ya en el primer trueque, obtendrá una T; a partir de ese momento todo serán P, hasta que uno de los contratantes muera. Si hubiese tenido usted un poco de paciencia antes de empezar a defraudar podría haberse beneficiado de una relación mutuamente cooperativa, acumulando muchas R de antemano. Como es obvio, todo ese montón de R llegará a sumar más que una sola T, a poco que el juego se sostenga durante algunas rondas. Esto demuestra que contra la estrategia SIEMPRE D la mejor estrategia es SIEMPRE D, mientras que contra la Represalia Masiva la mejor respuesta es "cooperar siempre, a menos que sepamos estar cerca del fin (propio o del otro), y en tal caso, defraudar". Este sencillo razonamiento demuestra que la forma en que debamos jugar depende del contrincante.

La idea misma de "calidad" de una estrategia cobra un sentido decididamente más operativo y empírico imaginando un océano poblado por docenas de pequeños organismos que pu-

		Proveedor: Cooperar	Proveedor: Defraudar
Nosotros	Cooperar	(2,2)	(−1,4)
	Defraudar	(4,−1)	(0,0)

El par (x, y) significa que nosotros logramos x puntos y el proveedor y puntos.

1. Una posible matriz de pagos para un dilema del preso

		Nuestro cómplice	
		Boca cerrada	Canta
Nosotros	Boca cerrada	(−2,−2)	(−5,0)
	Cantamos	(0,−5)	(−4,−4)

El par (−*x*, −*y*) significa que nosotros somos condenados a *x* años de cárcel y nuestro cómplice a *y* años.

2. Una matriz de pagos para auténticos presos del dilema del preso

lulan nadando en él, y que una y otra vez juegan entre sí al dilema del preso. Supongamos que cada vez que dos de tales organismos se encuentran accidentalmente se reconocen y recuerdan cómo actuaron en encuentros anteriores; ello le permite a cada uno decidir lo que va a hacer en este caso. Ahora, si cada organismo está continuamente nadando y chocando al azar con los otros, al cabo de mucho tiempo cada uno se habrá tropezado con los demás muchas veces y, por tanto, todas las estrategias habrán tenido oportunidad de interactuar con las demás. Al decir "interactuar", no se quiere significar que ninguno de los organismos expulse del océano a ninguno de los otros, como si se tratase de un torneo eliminatorio. La idea es, sencillamente, que cada organismo se habrá tropezado con los demás el mismo número aproximado de veces; la cuestión pendiente será: ¿cuál de ellos habrá acumulado mayor puntuación?

De nada sirve al organismo *X* haber "vencido" al organismo *Y*, en el sentido de que *X* ha ganado, al interactuar con *Y*, más puntos que los que *Y* ha ganado al interactuar con *X*. Tal tipo de "victorias" es aquí irrelevante. No cuenta el número de "victorias" del palmarés de cualquiera de los organismos, sino la *suma total de puntos* –número que expresa la viabilidad global en este "mar" concreto de múltiples estrategias. Casi puede parecer paradójico, pero un organismo pudiera incluso perder todas sus refriegas individuales con otros organismos y salir, no obstante, vencedor global.

Tal como la imagen sugiere, la situación tiene importancia en biología evolutiva. ¿Pudiera suceder que organismos totalmente egoístas e inconscientes, habitando un medio común, lleguen a desarrollar evolutivamente estrategias duraderas de carácter cooperativo? ¿Puede brotar la cooperación en un mundo de egoístas redomados? En pocas palabras: ¿puede surgir la cooperación de la no cooperación? De ser así, ello tendría revolucionaria importancia para la teoría de la evolución, porque muchos críticos de la teoría evolucionista han mantenido que, en este punto, la teoría se encontraba completamente atascada.

Sucede que se ha podido demostrar definitivamente que sí pueden surgir de la nada tales tipos de cooperación, y así se ha conseguido mediante un torneo computarizado llevado a cabo por Robert Axelrod, del Departamento de Ciencias Políticas y del Instituto de Estudios de Política Pública, ambos de la Universidad de Michigan en Ann Arbor. Hablando con mayor precisión, Axelrod empezó estudiando en qué formas evolucionaba la cooperación; cuando fueron emergiendo tendencias de carácter general, percibió los principios subyacentes y demostró teoremas que establecían los hechos y condiciones que gobiernan la aparición de sistemas cooperativos a partir de la nada. Axelrod ha escrito un libro muy sugestivo, que mueve a la reflexión, *The Evolution of Cooperation*, que pronto será publicado por Basic Books. Además, conjuntamente con William D. Hamilton, especialista en biología evolutiva, ha elaborado y publicado muchas de las consecuencias que estos descubrimientos tienen en la teoría de la evolución. El trabajo de ambos ha merecido gran atención además del Newcomb Cleveland Prize de 1981, galardón que anualmente concede la Asociación Americana para el Progreso de las Ciencias a "un artículo sobresaliente que se haya publicado en *Science*".

		Jugador B	
		Coopera	Defrauda
Jugador A	Coopera	(3,3)	(0,5)
	Defrauda	(5,0)	(1,1)

3. Matriz canónica de pagos para el dilema del preso

En la cuestión de si pueden darse formas de cooperación en un mundo de egoístas hay en realidad tres aspectos a distinguir. El primero, cómo puede suscitarse tal cooperación; el segundo, si las estrategias cooperativas sobreviven mejor que sus rivales no cooperativas. Y el tercero, ¿cuáles serán las estrategias cooperativas óptimas y cómo podrán llegar éstas a predominar?

Para dar a estos tres puntos mayor viveza, permítaseme describir el torneo ideado por Axelrod, y algunos de sus estupefacientes resultados. En 1979, Axelrod envió invitaciones a cierto número de teóricos profesionales de la teoría de juegos, entre ellos personas que habían trabajado con anterioridad en el Dilema del Preso, explicándoles que deseaba enfrentar unas con otras tantas estrategias cuantas fueran posibles en un torneo del tipo "todos contra todos", siendo el objetivo global de cada una de las estrategias en liza lograr acumular más puntos que cualquiera de las otras. Pedía además que tales estrategias viniesen ya codificadas como programas de ordenador capaces de responder al signo *C* (cooperación) o *D* (defraudación) de otro jugador con uno de estos dos símbolos, tomando en cuenta el historial de anteriores encuentros con el mismo jugador. El programa debería siempre responder con una *C* o una *D*, pero no estaba obligado a que su respuesta fuese determinística; era lícito consultar en cualquier momento de aplicación de la estrategia un generador de dígitos aleatorios.

Axelrod recibió catorce propuestas. Añadió por su cuenta un programa más, que denominó RANDOM ("AZAR"); en cada uno de sus turnos decidía lanzando una moneda (obviamente, simulada por ordenador) si iba a cooperar o no: cooperar si sale cara; defraudar si sale cruz. La concurrencia, variopinta, iba desde programas de sólo cuatro líneas hasta un máximo de 77 (en el lenguaje BASIC de programación de ordenadores). Cada programa tuvo que enfrentarse 200 veces a cada uno de los demás (más una copia clónica de sí mismo). Además, el torneo se repitió cinco veces seguidas, para que al tomar promedios se fueran alisando los pseudoefectos provocados por fluctuaciones estadísticas del generador de números aleatorios.

El programa finalmente vencedor fue el presentado por una mano ya experimentada en el problema del preso: Anatol Rapoport, psicólogo y filósofo de la Universidad de Toronto. Era el suyo el más breve de todos los programas presentados, y se llamaba TIT FOR TAT. (Algo así como "Tal para cual".) La táctica del TIT FOR TAT es muy sencilla: cooperar en la primera jugada, y en lo sucesivo, hacer lo mismo que haya hecho el otro jugador en

la jugada precedente. Esto es todo; su simplicidad parece casi insultante. ¿Cómo pudo un programa semejante derrotar a las complejas estratagemas ideadas por otros expertos?

En general, Axelrod sostiene que los teóricos no fueron lo suficientemente lejos en su análisis. Sólo llegaron a "profundidad dos", cuando para lograr resultados mejores debieron llegar, por lo menos, a "profundidad tres". ¿Qué pretende decirnos con esto? Para ilustrar su tesis, Axelrod toma un caso concreto. Fijémonos en el programa llamado JOSS (presentado por Johann Joss, un matemático de Zurich). La estrategia de JOSS es muy parecida a la de TIT FOR TAT, pues empieza también cooperando, responde siempre con engaño al engaño y *casi* siempre responde cooperativamente a la cooperación. Su único tropiezo está en que se vale de un generador de números aleatorios para ayudarle a decidir cuándo largarle por sorpresa un "embolado" al otro jugador. El programa JOSS está concebido para que, por término medio, defraude en un diez por ciento de las jugadas consecutivas a la cooperación del otro jugador.

Al jugar con TIT FOR TAT, el programa JOSS va funcionando perfectamente, hasta que intenta coger desprevenido a TIT FOR TAT. Cuando JOSS le defrauda, TIT FOR TAT se lo cobra con una única defección, mientras que JOSS, "inocentemente", retorna a su táctica de cooperación. Tenemos, así pues, un par *DC*. En la jugada siguiente, las *C* y *D* trocarán sus lugares, pues cada programa hace el eco de la última jugada del otro; el juego prosigue de esta forma: *CD*, después, *DC, CD, DC,* y así sucesivamente. Puede entonces seguir una prolongada reverberación desencadenada por la *D* de JOSS. Más pronto o más tarde, JOSS lanzará al azar, inesperadamente, otra *D* tras una *C* de TIT FOR TAT. En ese momento se producirá un par *DD*, lo cual determina ya la partida hasta el final. A partir de aquí, ambas estrategias se dedican a defraudar al contrario. El efecto de eco, consecuencia del primer intento de JOSS para explotar a su oponente, y el sencillo acto punitivo de TIT FOR TAT conducen en última instancia a la desconfianza y la falta de colaboración totales.

Lo cual parece indicar que ambas estrategias caen en defecto, y que a causa de él habrán de sufrir a manos de otros; en realidad, la que más lo padece es JOSS, pues JOSS intenta una y otra vez el mismo truco en socio tras socio, lo que en muchos casos, por su codicia, lleva a la total desconfianza; en cambio, TIT FOR TAT, no siendo nunca el primero en defraudar, nunca será causa inicial de la pérdida de confianza. El término que Axelrod ha acuñado para estas estrategias que nunca defraudan sin que antes lo hayan hecho sus contrarios es "nice", que traduciremos por "cumplidoras". Es preciso tener muy presente que al decir "cumplidora" no se dice que la estrategia jamás defraude. No, TIT FOR TAT procura engañar cuando es engañada, a pesar de lo cual se la considera "cumplidora".

Así resume Axelrod su primer torneo: "Una de las principales lecciones que este torneo nos enseña es la necesidad de hacer mínimos los 'efectos de eco' en ambientes de potencia mutua. Un análisis cuidadoso debe profundizar, cuando menos, hasta el tercer nivel. En el primer nivel se estudian los efectos directos que produce una determinada elección. Eso es fácil, pues la defección da siempre pagos mayores que la cooperación. En el segundo tenemos los efectos indirectos, que toman en cuenta que la otra parte puede o no castigar nuestra defección. Todo esto lo tuvieron en cuenta la mayoría de los participantes. Pero el tercero requiere advertir que, al responder a las defecciones del otro bando, podemos estar repitiendo, e incluso amplificando, una decisión anterior encaminada a abusar del contrario. Por tanto, una sola defección puede parecernos beneficiosa por sus efectos directos, e incluso tal vez también al analizar sus efectos secundarios. Pero sus verdaderos costos pueden encontrarse al nivel terciario, cuando las defecciones cometidas por uno de los bandos se convierten en una sucesión interminable de mutuas recriminaciones. Sin darse cuenta, muchas de estas reglas tendentes a abusar del contrario acában por significar formas de auto-penalización. Pues al actuar el otro jugador como mecanismo de retardo de la penalización durante unos cuantos turnos, este aspecto de autocastigo pasa desapercibido al redactar las reglas de decisión...

"El análisis de los resultados del torneo muestra que hay mucho que aprender acerca de cómo progresar en un ambiente de fuerzas en conflicto. Incluso estrategias de expertos procedentes de campos como las ciencias políticas, la sociología, la economía, la psicología o las matemáticas, cometieron errores sistemáticos, por mostrarse demasiado 'agresivas', no 'perdonar' lo suficiente y ser demasiado 'pesimistas' sobre las respuestas que darán sus contrarios."

Axelrod no se limitó a analizar el primer torneo, sino que además llevó a cabo cierto número de "repeticiones subjuntivas" de él, es decir, repeticiones del torneo, pero limitando la participación a subconjuntos escogidos. Descubrió, por ejemplo, que la estrategia TIT FOR TWO TATS, que tolera dos defecciones antes de enloquecer de rabia (y devolver sólo un golpe como represalia) *hubiera* ganado, de haber entrado en concurso. Análogamente, otras dos estrategias que él descubrió, llamadas REVISED DOWNING y LOOK-AHEAD, hubieran terminado las primeras si hubieran entrado en el torneo.

Resumida, la lección del primer torneo parece concluir que es importante "ser cumplidor" ("No sea el primero en defraudar") y que también lo es "saber perdonar" ("No guardes rencor hasta dar curso a tu ira"). TIT FOR TAT posee ambas propiedades.

Tras este cuidadoso análisis, Axelrod tuvo la impresión de que habían salido a la luz importantes lecciones, y se convenció de que podrían urdirse ahora estrategias más perfeccionadas, que sacaran partido de la nueva información disponible. Decidió, por consiguiente, convocar un segundo torneo computarizado mucho mayor. Para ello, no sólo invitó a todos los participantes del primero, sino que se anunció en las revistas de aficionados a la informática, confiando en atraer a "programadictos" dispuestos a dedicar mucho tiempo a elaborar y perfeccionar sus estrategias. A cada uno de los participantes del segundo torneo Axelrod les envió un análisis detallado de los resultados del primero, más una discusión de las "repeticiones subjetivas" y de las estrategias que en ellas habrían tenido éxito. Explicó las estratégicas nociones de "cumplimiento" y "magnanimidad", o capacidad de perdón, enseñanzas en que parecían condensarse las experiencias del primer torneo, y explicó asimismo los fallos de estrategia que seguramente convenía rehuir. Naturalmente, cada concursante tenía perfecta conciencia de que los demás habrían recibido idéntica información, con lo que todo el mundo sabía que todo el mundo sabía que...

La convocatoria de Axelrod recibió amplia respuesta. Llegaron participaciones procedentes de seis países, de personas de todas las edades, y de ocho disciplinas académicas distintas. Rapoport participó también, nuevamente presentando su TIT FOR TAT (y fue el único, además, que lo presentó, no

obstante haberse anunciado explícitamente que podía participar todo el mundo con el programa que quisiera). Concursó un niño de 10 años, hombro con hombro con uno de los máximos expertos, a nivel mundial, de teoría de juegos, John Maynard Smith, profesor de biología en la Universidad de Sussex, quien concursó respaldando a TIT FOR TWO TATS. Dos individuos, sin previo acuerdo, apoyaron el REVISED DOWNING. En total se recibieron 62 programas, en términos generales, considerablemente más perfectos que los del primer torneo. Nuevamente fue TIT FOR TAT el más breve de todos; el más extenso, remitido desde Nueva Zelanda, constaba de 152 líneas de FORTRAN. También RANDOM volvió a entrar en liza, y con un gesto florido, más una última pulsación de la tecla de "retorno del carro" de la terminal del ordenador, los caballos iniciaron su galopada. Tras algunas horas de funcionamiento de la computadora, los primeros resultados comenzaron a llegar.

Lo menos que puede decirse del resultado es que es estupefaciente. ¡Nuevamente venció TIT FORT TAT, el más breve de todos los programas presentados! Los dos programas que habían vencido en las repeticiones subjuntivas del primer torneo quedaron ahora bien abajo en la lista: TIT FOR TWO TATS entró en vigésimocuarto lugar, mientras que REVISED DOWNING acabó sepultado en la segunda mitad de la lista. Tal vez esto pueda parecer diametralmente opuesto a la intuición, pero debe recordarse que el éxito de un programa depende por completo del ambiente donde se encuentra sumergido. No existe una "estrategia óptima" válida para todos los ambientes, así que lograr la victoria en este torneo no es garantía de lograrla en un ambiente distinto. TIT FOR TAT tiene la ventaja de "progresar bien" ante gran variedad de estrategias, mientras otros programas poseen una capacidad menor para evocar e inducir a cooperación.

Así lo expresan Axelrod: "Lo que parece haber ocurrido es una interesante interacción entre quienes sacaron del primer torneo una lección y quienes extrajeron otra. La "Lección Primera" venía a decir: "Sea cumplidor y capaz de perdonar"; la "Lección Segunda" era de carácter más explotador: "Si hay otros dispuestos a ser cumplidores y tolerantes puede dar resultado intentar sacar ventaja de ellos". Quienes sacaron del primer torneo la Lección Primera fueron en el segundo víctimas de quienes extrajeron la Segunda".

Por tanto, la mayoría de quienes intervinieron en el segundo torneo no alcanzaron a captar la lección fundamental que enseñó el primero, a saber, la importancia de estar dispuesto a ofrecer y reciprocar cooperación. Axelrod tiene al respecto tan fuertes convicciones que no se aviene a llamar "oponentes" a dos estrategias que juegan enfrentadas; en su libro emplea siempre términos neutros, como "estrategias", "jugadores", etcétera. Ni siquiera le gusta decir que las estrategias juegan una *contra* otra, y prefiere decir *con*. En el segundo torneo fue muy llamativo el éxito de las estrategias "cumplidoras": de las 15 clasificadas en cabeza, tan sólo una (la octava) era "nocumplidora". Cómicamente, se produjo en la cola una situación análoga "en negativo": de las quince colistas sólo una era "cumplidora".

Varias estrategias no-cumplidoras se caracterizaban por "tantear" al contrario buscando averiguar hasta qué punto le "molestaba" ser defraudado. Aunque los tanteos de este tipo podían en ocasiones engañar a algún que otro incauto, lo más frecuente era que el tiro les saliera por la culata, provocando graves pérdidas de confianza. Al mismo tiempo se mostró que resultaba muy oneroso intentar "levantar" los puntos débiles del contrario para "tirarles" cómodamente. La experiencia mostró ser más rentable la política de cooperación, todo lo frecuente que las circunstancias permitan, junto con la disposición a tomar represalia inmediata contra todo intento de juego sucio. Observemos, por otra parte, que las estrategias de "represalias en masa" tuvieron menos éxito que TIT FOR TAT, cuyo plan de represalias es mucho más suave y moderado. La "capacidad de perdón", fundamental, ayuda a restablecer la proverbial "atmósfera de mutua cooperación" (como gustan decir los diplomáticos) tras una refriega.

En esencia, la lección que globalmente enseñó el primer torneo fue "cumplid y sed magnánimos". Mucha gente –tal parece– no llegó a creérselo, convencidos como estaban de que con mayores astucias y con ardides más refinados podrían arrimar el ascua a su sardina. Hizo falta el segundo torneo para mostrarles que andaban equivocados. Del segundo torneo afloró una tercera noción estratégica clave: la de *provocabilidad* –la idea de que ante la traición se "debería perder el control" y tomar represalias. Así pues, una lección más general sería: "Sed cumplidores, aprended a perdonar, pero responded a las provocaciones".

Axelrod llama "robustas" a las estrategias capaces de desenvolverse con éxito en una amplia variedad de ambientes; diríase que las estrategias con "buenos rasgos de personalidad", es decir, cumplidoras, provocables y magnánimas, tuvieran asegurada tal "robustez". No es en forma alguna cierto que TIT FOR TAT sea la única estrategia posible que presente estos rasgos, pero sí constituye el ejemplo canónico de todas ellas; y su robustez nos deja atónitos.

Tal vez las más vívidas demostraciones de la robustez de TIT FOR TAT las hayan proporcionado determinadas repeticiones subjuntivas del segundo torneo. De todos los tipos de repetición que Axelrod ensayó (la mayoría ganadas por TIT FOR TAT), la más significativa e ingeniosa fue el "torneo ecológico". Tal justa consiste no sólo en una repetición subjuntiva, sino en toda una cascada de hipotéticas repeticiones, determinada cada una de ellas por los resultados de la repetición precedente. En particular, si se toma la puntuación que un programa logra en un torneo como medida de su "adecuación", se interpreta "adecuación" como "número de progenie en la siguiente generación", y finalmente, si se toma "generación siguiente" como "próximo torneo", lo que se obtiene entonces es que los resultados de cada torneo determinan el ambiente donde se desarrollará el próximo, y que los programas que hayan tenido más éxito serán más numerosos en él. Este tipo de torneo iterativo se llama "ecológico" porque remeda la adaptación ecológica (los reajustes que un conjunto fijo de poblaciones de especies van experimentando de acuerdo con los ambientes que mutua y dinámicamente definen y desarrollan), en contraste con los aspectos mutacionales de la evolución, donde *sí* se considera la aparición de *nuevas* especies biológicas.

Conforme vamos desarrollando un torneo ecológico, generación tras generación, el ambiente va cambiando gradualmente. Al principio están representados por un igual tanto los programas buenos como los mediocres. Conforme avanza el tiempo, los peores quedan eliminados, mientras que los mejores empiezan a proliferar y multiplicarse. Sin embargo, el orden de clasificación de los buenos puede ahora cambiar, porque su "bondad" ya no está medida frente al mismo conjunto de competidores.

Así pues, el éxito engendra siempre más éxito, a condición de que el éxito sea consecuencia de la interacción con otros programas de idéntico éxito. Si, por contraste, el éxito de un determinado programa se debe principalmente a su capacidad para "desplumar" a programas "pardillos", es fácil comprender que, conforme tales programas van siendo esquilmados, la "base" de que se sustenta el "depredador" se va achicando por momentos, hasta que finalmente el programa "depredador" termina por correr esa misma suerte.

Entre los ejemplos concretos de extinción ecológica tenemos el programa HARRINGTON, el único de los no-cumplidores que quedó colocado entre los quince de cabeza en el segundo torneo. En las 200 primeras "generaciones" del torneo ecológico, al tiempo que TIT FOR TAT y otros programas cumplidores iban gradualmente aumentando sus proporciones en la población, HARRINGTON iba también aumentando su propio porcentaje. Ello resultaba de la estrategia de explotación de los contrarios en que se basa HARRINGTON. Hacia la bicentésima generación o así, la situación empezó a cambiar. Los programas más débiles comenzaron a extinguirse, lo que implicaba que cada vez hubiera menos "incautos" a los que HARRINGTON sacara el jugo. Pronto se vio clara la tendencia: HARRINGTON no podía mantenerse a la par con sus rivales más cumplidores. Hacia la milésima generación, HARRINGTON estaba tan exhausto como los vejestorios de que había estado nutriéndose.

Axelrod nos lo resume así: "A la larga, pretender progresar a base de reglas que no obtienen puntos por sí mismas, sino a costa de otras, termina provocando la propia derrota. Ser no-cumplidor puede parecer al principio prometedor, pero a la larga puede destruir el ambiente mismo que le es imprescindible para su propio éxito."

Inútil es decirlo, TIT FOR TAT se las apañó admirablemente en el torneo ecológico, aumentando cada vez más su ventaja. A la vuelta de 1000 generaciones, no sólo TIT FOR TAT llevaba la delantera, sino que su tasa de crecimiento era mayor que la de cualquiera de los otros programas supervivientes. Esta reseña de semejante éxito casi resulta increíble, vista la ridícula sencillez de nuestro "héroe". Un aspecto curioso, muy llamativo, es que TIT FOR TAT no venció en ningún encuentro ni a uno solo de sus rivales. Y eso no fue pura chiripa, sino que es propiedad intrínseca suya. TIT FOR TAT no puede vencer a nadie; en un encuentro, lo más que puede alcanzar es un empate; pierde con frecuencia (aunque no por mucha diferencia).

Axelrod deja muy claro este aspecto: "TIT FOR TAT ganó el torneo, pero no por vencer a los otros jugadores, sino al inducirlos a comportarse de modo que ambos, él y el otro, consiguiesen buenos resultados. Tan sistemático fue TIT FOR TAT en lograr que ambos jugadores obtuvieran resultados mutuamente satisfactorios, que logró una puntuación total mayor que cualquiera de las restantes estrategias del torneo.

"Así pues, en un mundo de suma no nula, para hacerse con buenos resultados no es preciso lograr mejores resultados que los demás. Lo que resulta cierto, sobre todo, cuando se interactúa con jugadores diferentes. Dejar a cada uno de ellos puntuar e incluso más que uno mismo, puede ser formidable, siempre y cuando ello nos dé a nosotros buenos beneficios. Carece de sentido envidiar el éxito de ningún jugador,

pues en un Dilema del Preso iterado y de larga duración el éxito del otro es prerrequisito virtual del éxito propio".

Axelrod nos ofrece un ejemplo, tomado de la vida ordinaria, donde este principio goza de validez. Hélo aquí: "Una firma comercial que compre a un proveedor puede esperar que una relación largamente sostenida con éxito será provechosa para ambas partes. Carece de sentido envidiar las ganancias del proveedor. Todo intento de reducirlas mediante prácticas de no-cooperación, como puede ser no efectuar los pagos adeudados en los plazos debidos, sólo servirá para inducir al proveedor a tomar represalias. Tales medidas pueden adoptar muchas formas, que no suelen llamarse explícitamente castigos, y que pueden convertirse en retrasos en el suministro, control de calidad menos estricto, actitudes más reticentes en descuentos por compra al por mayor, noticias menos frecuentes o menos oportunas acerca de las condiciones que prevalecerán en el mercado... Las represalias pueden hacernos pagar muy cara nuestra envidia. En lugar de preocuparnos de los beneficios relativos del proveedor, más nos valdría averiguar una estrategia de compras más eficiente."

A modo del socio comercial que nunca engaña a nadie, TIT FOR TAT jamás vence en los encuentros individuales, y, no obstante, ambas partes logran para sí buenos resultados.

Una de las ideas más sorprendentemente contrarias a la intuición con que nos tropezamos al principio en el Dilema del Preso es que, si el otro jugador se muestra insensible, la mejor estrategia que podemos seguir es SIEMPRE D. Pudiera parecer que alguna forma de estrategia aleatoria habría de cosechar mejores resultados, pero ello es del todo erróneo. Si yo tengo ya decididos por adelantado mis movimientos, de nada va a servirle aplicar frente a mí TIT FOR TAT, ni tampoco jugar al azar. Lo que debe usted hacer es, sencillamente, "fallar" en cada jugada. Poco importa cuál sea la pauta elegida por mí. Tan sólo si yo voy a modificar mi juego en función del suyo puede traerle alguna ventaja la cooperación.

Afortunadamente, en un ambiente donde haya programas que cooperen (y cuya cooperación dependa de una reciprocidad), mostrarse insensible es muy mala estrategia, lo que a su vez significa que jugar SIEMPRE D constituye una estrategia muy pobre. En el segundo torneo, el único de los participantes insensibles fue RANDOM, y terminó penúltimo. El "farolillo rojo" lo portaba una estrategia influible, pero cuya conducta era tan inescrutable que realmente *parecía* insensible. Y en un torneo computarizado más reciente, que desarrollamos Marek Lugowski y yo en el Departamento de Ciencias de Cómputo de la Universidad de Indiana, tres SIEMPRE D quedaron los últimos absolutos (de un total de 55), con un par de RANDOM disputándose fieramente tal honor.

Una forma de explicar el éxito de TIT FOR TAT es decir, sencillamente, que induce a cooperar mediante amigable persuasión. Así lo expone Axelrod: "Parte del éxito [de TIT FOR TAT] pudiera deberse a que otras reglas prevén ya su presencia y están diseñadas para lograr altas puntuaciones al jugar con él. En efecto, al jugar con TIT FOR TAT, para lograr altas puntuaciones es preciso cooperar con él, y esto ayuda a su vez a TIT FOR TAT. Incluso reglas que fueron diseñadas para coger lo que se pueda y salir huyendo, para la rapiña, rápidamente piden disculpas al jugar con TIT FOR TAT. Cualquier regla que pruebe abusar de TIT FOR TAT sólo conseguirá perjudicarse a sí misma. TIT FOR TAT saca además partido de su inexplotabilidad, porque cumple tres condiciones:

"1. La posibilidad de tropezarse con TIT FOR TAT es grande.

"2. Una vez que otro programa se tropieza con él, le resulta fácil reconocerlo; y

"3. En cuanto ha sido reconocido, su inexplotabilidad es fácil de apreciar."

Estas observaciones ponen de manifiesto un cuarto "rasgo de personalidad" que puede tener un papel importante para alcanzar el éxito, el de ser "reconocible", lo que podríamos llamar "franqueza" y que Axelrod ha preferido llamar "claridad". También con claridad argumenta Axelrod en su favor: "Una complejidad excesiva puede confundirse con caos total. Aplicando una estrategia que parezca ser aleatoria, al otro jugador le pareceremos refractarios, y no tendrá incentivo para jugar con nosotros. Por tanto, ser tan complejo que se dé la impresión de ser incomprensibles resulta sumamente peligroso". ¡Cuánta enjundia tienen estos comentarios, y cuán aplicables son a la conducta social y política!

En carta a Axelrod, Rapoport advertía los riesgos que conlleva enfatizar demasiado las ventajas de TIT FOR TAT; en particular, Rapoport opina que en ocasiones su estrategia es demasiado brusca al tomar represalias. Podría también aducirse, persuasivamente, que demasiado indulgente en otras ocasiones. No hay prueba, desde luego, de que TIT FOR TAT sea la estrategia definitiva. Más todavía –y ya se ha insistido en ello varias veces– la noción de estrategia "óptima" es en este contexto incoherente, pues todo depende del entorno. En el torneo de la Universidad de Indiana varias estrategias análogas a TIT FOR TAT lograron mejores resultados que la versión pura de ésta. Todas ellas, empero, compartían los rasgos característicos –tres– cuya conveniencia claramente había enunciado Axelrod en su anterior análisis de las propiedades de TIT FOR TAT. Las nuevas versiones eran un poco más duchas en detectar indiferencia en la otra parte, y cuando así lo hacían, aplicaban la estrategia SIEMPRE D.

Axelrod, en su libro, se toma muchas molestias para dejar claras las respuestas a tres cuestiones fundamentales relativas a la evolución del comportamiento cooperativo en un mundo de egoísmo "en rama". La primera concernía a la *viabilidad inicial*: ¿De qué forma puede comenzar la cooperación en un mundo de defraudación incondicional –un "mar primordial"– donde pululan organismos SIEMPRE D, absolutamente insensibles? La respuesta (cuya demostración no daré aquí) es que una invasión por pequeños enjambres de organismos cooperativos, aunque formen una fracción muy minoritaria del total, es suficiente para dar a la cooperación un asidero, por precario que sea. Un único "cooperador" sin duda moriría; en cambio, pequeños enjambres de cooperadores pueden llegar (por mutación o migración, pongamos por caso) y propagarse incluso en un ambiente hostil, siempre y cuando sean capaces de represaliar y defenderse, como hace TIT FOR TAT.

La segunda cuestión fundamental concierne a la *robustez* de las estrategias. ¿De qué tipo serán para salir con éxito enfrentadas a entornos imprevisibles y mudables? Ya hemos visto que la respuesta a esta cuestión son las estrategias provistas de los cuatro rasgos "de personalidad" fundamentales: ser cumplidoras, capaces de responder a la provocación, ser magnánimas y ser claras. Significa esto que tales estrategias, una vez se han establecido, tenderán a florecer, particularmente en un mundo de evolución ecológica.

La última cuestión afecta a la *estabilidad*: ¿podrá la cooperación protegerse a sí misma frente a invasiones? Axelrod demostró que *sí* puede. Hay, de hecho,

una grata asimetría en sus hallazgos: aunque un mundo de "malos" (estrategias SIEMPRE D) puede ser vulnerable y ser invadida por enjambres cooperadores, un mundo de cooperadores *no* puede caer conquistado por los malvados, anque lleguen éstos en enjambres de tamaño arbitrariamente grande. Una vez que la cooperación ha quedado asentada, ya es permanente. Como dice Axelrod: "Los engranajes de la evolución social tienen retén de enclavamiento".

El término "social" no debe entenderse en el sentido de que estos resultados sean, por necesidad, válidos sólo para animales superiores capaces de pensar. Como es obvio, un programa de cuatro líneas no piensa, y no obstante, ha sido en un mundo de tales organismos donde se ha podido demostrar que la cooperación evoluciona. Las únicas "capacidades cognitivas" que requiere TIT FOR TAT son las de reconocer a "socios" anteriores y tener "recuerdo" de lo que ocurrió la última vez que lo tuvo por pareja. Incluso las bacterias son capaces de esto, al interactuar con un único organismo (lo conlleva el "reconocimiento" automático) y responder sólo a las más recientes acciones de su "socio" (con lo que la capacidad de recordación necesaria es mínima). Lo esencial es que los organismos implicados pueden ir desde la escala de las bacterias, pasando por los animales pequeños y grandes, hasta las naciones. No se requiere la "racionalidad reflexiva"; tanto así, que podríamos decir que TIT FOR TAT es "reflejiva" (por ser tan elemental como el reflejo de la rodilla) y no "reflexiva" (pues no puede "reflexionar").

Quienes piensan que sólo puede emerger conducta moral hacia los demás cuando existe alguna amenaza horrenda y externa (los fuegos del infierno, por ejemplo) o una consoladora promesa de recompensa celestial (la salvación eterna) deberían dedicar un momento a ponderar y meditar en los resultados de esta investigación. Axelrod ha captado íntegramente la idea en una frase: "La cooperación mutua puede surgir en un mundo de egoístas carentes de control central, a partir de un enjambre de individuos que confíen en la reciprocidad".

Hay en el mundo de hoy tantas situaciones donde estas ideas parecen ser de importancia extrema –tanto como su urgencia– que resulta difícil resistirse a extraer de ellas moralejas de todo tipo. En los últimos capítulos de su libro, Axelrod ofrece consejos acerca de cómo promover la cooperación en asuntos humanos, y al final, el especialista en ciencias políticas que hay en él aventura con cautela algunas conclusiones de carácter general acerca de los problemas del Globo, que, para terminar, me parecen sumamente pertinentes:

"En nuestros días, los problemas más acuciantes con que se enfrenta la humanidad se encuentran en la arena de las relaciones internacionales, donde las naciones, independientes y egoístas, se enfrentan unas con otras, en una situación cercana a la anarquía. Muchas veces estos problemas toman la forma de Dilema del Preso, iterado. Entre los ejemplos tenemos la carrera de armamentos, la proliferación nuclear, la crisis económica o la escalada de militarización. Como es obvio, para comprender en su extensión estos problemas sería preciso tener en cuenta muchos factores no incorporados en el sencillo enunciado del Dilema del Preso: la ideología, la política a nivel burocrático, los compromisos, coaliciones, mediaciones y liderazgos.

"Robert Gilpin [en su libro *War and Change in World Politics*] señala que desde la Grecia clásica hasta los estudios de nuestros días, toda la teoría política se encamina hacia una cuestión fundamental: ¿Cómo puede la raza humana, ya sea por fines egoístas o cosmopolitas, comprender y controlar las fuerzas aparentemente ciegas de la historia? En el mundo contemporáneo esta cuestión se ha convertido en particularmente acuciante ante el despliegue de las armas nucleares.

"Los consejos dados en este libro a los participantes en el Dilema del Preso pueden también servir de aviso a los dirigentes de todas las naciones: No seais envidiosos, ni los primeros en defraudar; devolved tanto la cooperación como la defección, y no os paseis de listos. Análogamente, las técnicas explicadas en este libro para promover la cooperación en el Dilema del Preso podrían resultar útiles para promover la cooperación.

"El nudo del problema consiste en que es largo y muy penoso ir aprendiendo a base de tanteos. Tal vez las condiciones favorezcan todas ellas los desarrollos a largo plazo; pero quizás andemos escasos de tiempo para esperar que procesos conducidos a ciegas vayan encaminándonos hacia estrategias mutuamente remuneradoras, basadas en la reciprocidad. Tal vez, si nuestra comprensión del proceso fuese más honda, pudiéramos valernos de ella para acelerar el proceso evolutivo de la cooperación".

Taller y laboratorio

El movido llanto de un vino fuerte

Jearl Walker

Si se deja reposar durante dos o tres minutos el vino vertido en un vaso, es casi seguro que en el interior de éste se formará un curioso conjunto de gotas en la parte contigua a la superficie del líquido; en particular, si el vino es de cierta graduación. Este fenómeno, conocido por "llanto del vino fuerte", ya fue examinado en 1855 por James Thomson, ingeniero y físico británico, quien sacó la conclusión de que su origen no se encuentra en la condensación de agua sobre una superficie fría, pues las gotas aparecen aun cuando el vaso esté a la temperatura ambiente. En su opinión, las gotas se formaban en virtud de las variaciones que experimentaba la tensión superficial del vino conforme el alcohol se iba evaporando de una película delgada de aquél, que hubiera quedado en la superficie del vidrio.

Desde entonces, la formación de las lágrimas del vino constituye un tema obligado en todas las disciplinas que estudien la organización de los flujos circulatorios en los líquidos de tensión superficial variable. Aunque estos movimientos llevan más de un siglo sujetos a indagación, su realidad física sigue desconocida en muchos detalles. Su interés para la física radica en que se trata de un buen útil de trabajo para estudiar la tensión superficial y la estabilidad de los flujos circulatorios de los líquidos. Estos movimientos encierran otro motivo de interés para el aficionado: se presentan en numerosos procesos industriales y biológicos.

Aunque la explicación de Thomson acerca del llanto del vino fuerte era correcta en líneas generales, sus investigaciones no llamaron la atención hasta que, en 1869, Gustav L. van der Mensbrugghe replanteó, en una publicación belga, toda la cuestión del movimiento creado por la tensión superficial. Dos años después, el italiano Carlo Marangoni reclamó para sí la originalidad de las investigaciones. Así, el trabajo pionero de Thomson quedó relegado al olvido y es el nombre de Marangoni el que aparece vinculado al fenómeno del movimiento de los líquidos producido por la tensión superficial.

La explicación de Thomson se basa en el hecho siguiente: al añadir alcohol al agua, disminuye la tensión superficial de ésta. Ello explica que el vino tenga una tensión superficial inferior a la del agua. Cuando se expone vino al aire, se crean en su superficie zonas de mayor tensión, ya que el alcohol que contiene no cesa de evaporarse. Estas tiran del líquido contiguo y lo ponen en movimiento.

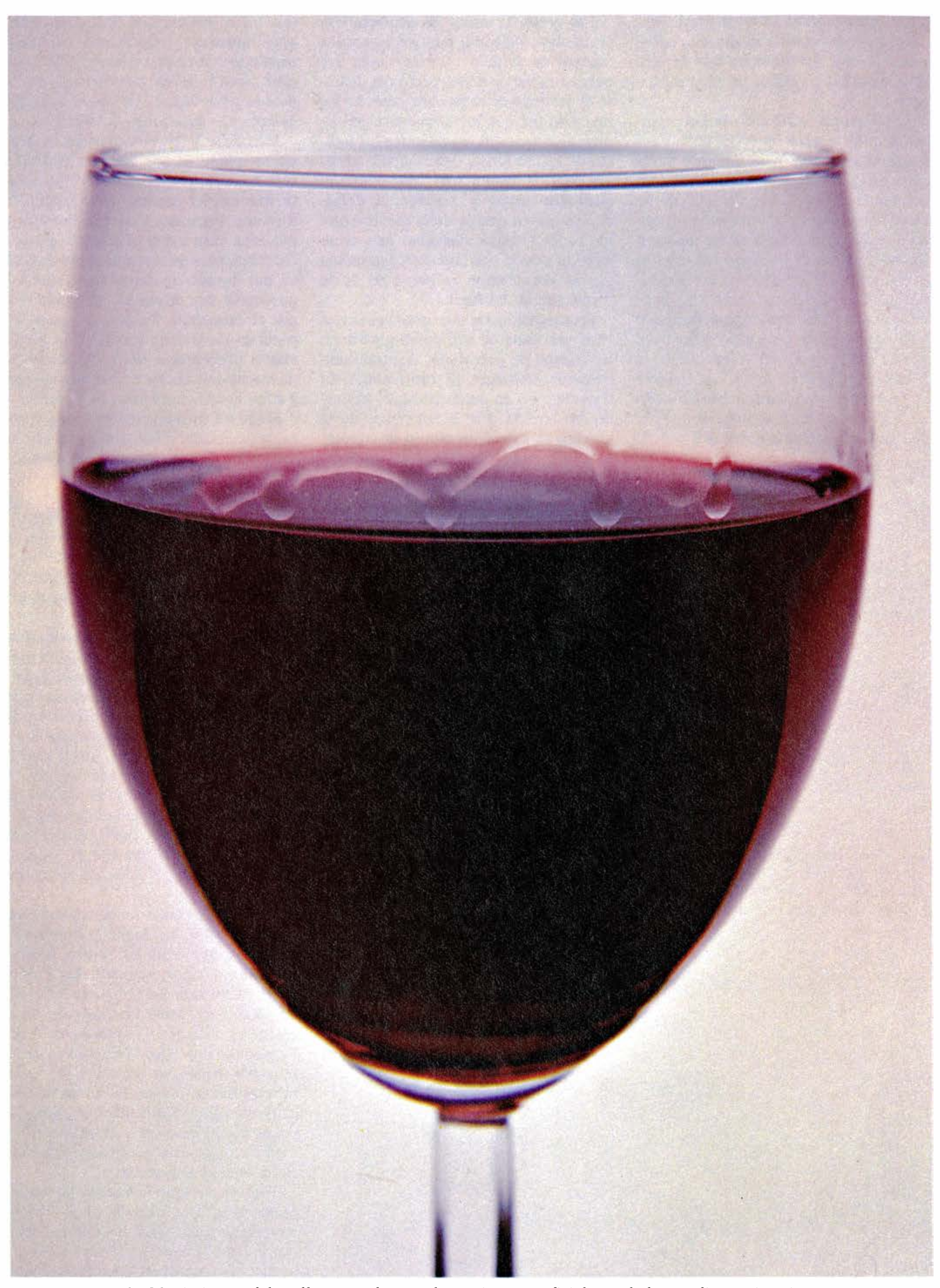
La formación de lágrimas en la pared de un vaso de vino es un fenómeno que se aprecia a simple vista; débese a una variación de la tensión superficial de la misma naturaleza. La superficie del líquido es curva en su contacto con la pared porque la tensión superficial en la superficie de separación entre el vino y el vidrio hace que el primero ascienda un corto tramo por el segundo.

El alcohol se evapora de esa película delgada, aumenta así la tensión superficial y sube más vino. Thomson advirtió que este líquido adicional tendía a formar un anillo grueso en la parte superior de la película. A medida que se evapora alcohol y aumenta la tensión superficial de la película, el líquido empieza a contraerse en pequeñas gotas. Entonces, asciende más líquido, se evapora más alcohol y las gotas engordan; hasta que alguna de éstas adquiere peso suficiente para resbalar y retornar al vino. Pero no tarda en formarse otra gota en el lugar de esta última, pues prosigue la evaporación en la película y continuamente asciende líquido nuevo. Este proceso persiste hasta que se haya eliminado alcohol en tal cantidad que la variación de la tensión superficial se haga demasiado pequeña para mantener el ciclo en marcha.

Thomson comprobó el papel de la evaporación taponando un frasco parcialmente lleno de vino. Tras agitarlo, examinó la película que se formaba sobre la pared interna. No observó lágrimas, ni se evidenciaba movimiento alguno en la película, salvo el escurrimiento normal. Retiró entonces el tapón, para renovar el aire del frasco. En esas condiciones, según consignó, "al instante se ve una película de líquido, que trepa lentamente por el interior del frasco y de la que, a modo de flecos de cortina, descienden chorros de líquido espeso o de aspecto untuoso". Al restituir el tapón y sacudir el frasco, el alcohol saturó el aire encerrado hasta el punto de bloquear la evaporación. Renovaba el aire para restablecer la evaporación y el ciclo de movimiento del líquido inducido por la variación de la tensión superficial.

También yo he comprobado la formación de lágrimas en varios tipos de bebidas alcohólicas. Para empezar vertí un poco de ginebra de 94,6 grados en un vidrio de reloj. (La graduación está ligada a la concentración volumétrica de alcohol.) Junto al borde del vidrio se formaron casi inmediatamente cuatro lágrimas. La zona comprendida entre cada lágrima y el resto de la ginebra se encontraba visiblemente húmeda y, a veces, mostraba signos de movimiento. La ginebra es un líquido transparente, por lo que dudo que lo que viera moverse hacia arriba, por los costados del vidrio, fuese la ginebra en sí; lo más probable es que se tratara de motas de polvo atrapadas en la corriente. Entonces, para mejorar la visibilidad, rocié la superficie de la ginebra con polvos de licopodio, cuyas esporas microscópicas se quedan arriba y no se hunden. Si no tenemos licopodio a mano, sirve el talco, u otros polvos caseros a los que el agua y el alcohol no humedezcan en seguida.

Con el polvo distribuido a la manera de trazador rastreé toda la corriente de ginebra que trepaba por los costados del vidrio. En general, el movimiento era irregular; mas, por debajo de los puntos donde se formaba una lágrima, se tornaba decididamente ascendente.



1. Movimientos del vodka causados por la tensión superficial, revelados mediante vino tinto

(Esta irregularidad generalizada obedecía a que la película estaba evaporándose, lo que determinaba que la tensión superficial variara de un punto a otro.)

Las lágrimas acababan todas regresando a la ginebra, precipitándose repentinamente pendiente abajo o deslizándose poco a poco, hasta entrar en contacto con el líquido. En este último caso, la gota sufría una pequeña sacudida que la lanzaba hacia arriba un corto trecho. La causa principal de ello es que la gota pierde líquido al tocar la superficie; se alivian entonces y se hace más sensible a la tensión superficial que a su propio peso: la tensión superficial tira de ella hacia arriba, mientras que el peso la hunde hacia abajo. La sacudida la promueve asimismo el brusco salto de tensión superficial en la superficie de separación entre la gota y la ginebra.

Las gotas, al entrar en contacto con la ginebra, inyectan en ésta pequeños chorros de líquido, que se dejan ver porque su índice de refracción es distinto al del resto de la ginebra y curvan los rayos de luz que los atraviesan. Se supone que esta diferencia entre los índices de refracción se debe a dos hechos: los chorros tienen una concentración alcohólica mayor y, además, su densidad es mayor que la de la ginebra que los rodea. Mayor densidad que tiene que ver con el enfriamiento producido por la evaporación responsable de la formación de las lágrimas.

Prosiguiendo en mis investigaciones vertí una copa de ron de 80 grados en un cuenco de porcelana. Agregué una pequeña cantidad de condimento de chocolate en un punto contiguo al borde del líquido. Por la superficie de la ginebra se formó un dibujo de hermosas rayas purpúreas. Estas parecían muy animadas, impulsadas evidentemente por fuertes variaciones de tensión superficial en la superficie de la mezcla y por corrientes que se desarrollaban en el interior de la misma.

Introduje luego el cuenco en un horno templado (a una temperatura algo superior a 90 grados Celsius). En la cara interna del cuenco no tardaron en formarse lágrimas. Con una linterna y una lupa examiné el perímetro del ron. De trazadores para seguir el movimiento del líquido sirvieron las pequeñas partículas no disueltas, abandonadas por el chocolate. Partículas que se separaban rápidamente del borde y volvían a precipitarse hacia él, poniendo de manifiesto en ese punto una intensa y complicada circulación de líquido.

Hallé un trazador mejor en un colorante de cocina. Bastó una gotita añadida a una taza de alcohol isopropílico para colorear un tramo del perímetro. Pude observar así cómo una porción de alcohol coloreado llegaba al perímetro de la taza y comenzaba a trepar por la fina y no visible película de alcohol y agua que cubría la pared, para penetrar finalmente en una lágrima ya formada sobre aquélla.

Realicé entonces una comprobación sencilla, aunque decisiva, de la hipótesis de Thomson, que atribuía la aparición de las gotas a una diferencia en la tensión superficial de la película que cubre la pared. Supongamos que el alcohol no contuviese agua. En tal caso la tensión superficial apenas variaría a medida que se evaporase el alcohol de la pared, o de la vecindad de ésta. En realidad, no variaría nada, si descartamos la fracción debida al enfriamiento del líquido subsiguiente a la evaporación.

Preparé dos tazas gemelas. Vertí en una cierta cantidad de alcohol isopropílico al 70 por ciento. En la otra, eché la mitad de alcohol que en la anterior y luego añadí agua hasta igualar los niveles en ambas. Moví las dos para arremolinar los líquidos de modo que éstos mojaran las paredes. Por encima de la muestra diluida se formaron lágrimas inmediatamente. Por encima de la concentrada aparecieron algunas, aunque pocas e insignificantes. Thomson tenía razón: el agua es necesaria para que varíe la tensión superficial.

Todo factor que favorezca la evaporación coadyuva también en la formación de lágrimas. Así, un entorno cálido, la luz solar directa y un recipiente ancho y poco profundo facilitan mucho las cosas. Con una bandeja de bordes

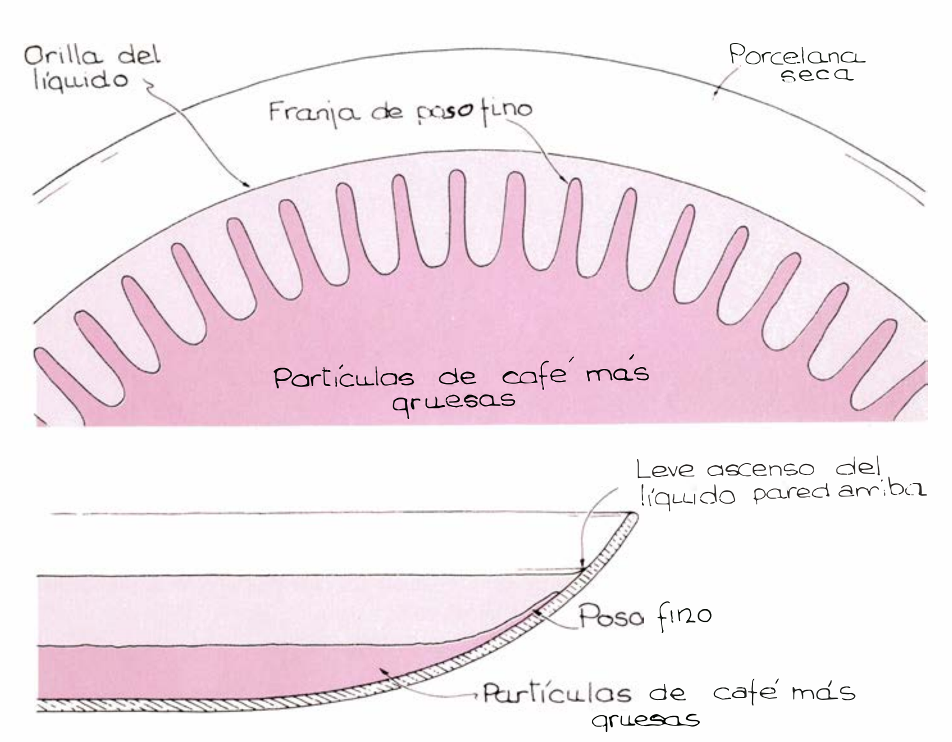
2. Fuerzas responsables del "llanto del vino fuerte"

curvos hacia arriba conseguí una auténtica muestra "plañidera". Un vaso alto con poco líquido no da buenos resultados, porque la evaporación es lenta, a menos que humedezcamos bien antes la pared interna. De este modo, cuando se introduce alcohol en el vaso, la película líquida trepa rápidamente por ella, elevándose más o menos hasta la altura de la zona humedecida. La aparición de las lágrimas varios centímetros por encima de la mezcla casi parece cosa de magia. Efectivamente, cualquier observador diría que son verdaderas gotas de condensación; pero si para mostrar su origen se colorea el líquido que reposa en el fondo del vaso, se verá que las lágrimas quedan teñidas también.

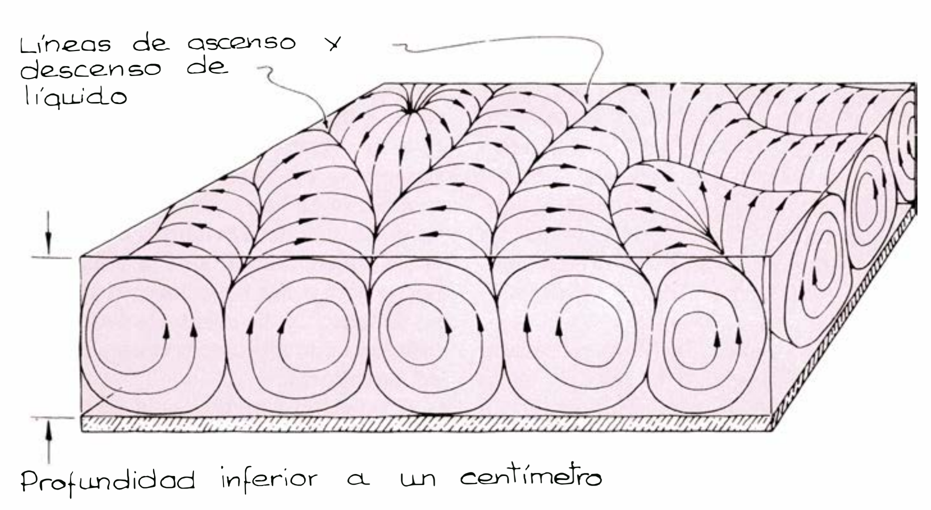
Podría ser interesante estudiar el llanto de distintas bebidas alcohólicas. Las cervezas norteamericanas no sirven, al menos en lo que a mis experiencias respecta, evidentemente porque contienen muy poco alcohol. ¿Podría encontrar el lector líquidos que lloren, distintos del alcohol y el agua?

En estas indagaciones sobre el llanto del vino fuerte me hallaba, cuando tenía sobre la mesa el borrador del artículo acerca del café turco que les ofrecí el mes pasado. Esta bebida, recuerden, se compone de agua, azúcar y café finamente molido, que se infunden conjuntamente y se sirven en una taza junto con los granos. En mi trabajo llegué a preparar tales cantidades de infusión que hube de guardarla en tazones. Cuando, una mañana, procedía a lavar la vajilla, en uno de los tazones de café que habían quedado de la noche anterior descubrí ciertas señales que me llamaron la atención. En toda la orilla del líquido, inmediatamente por debajo de su superficie, se veía nítidamente un conjunto de bandas oscuras de sedimentos de café. Tanto éstas como las bandas limpias que se intercalaban entre ellas tenían una anchura de varios milímetros.

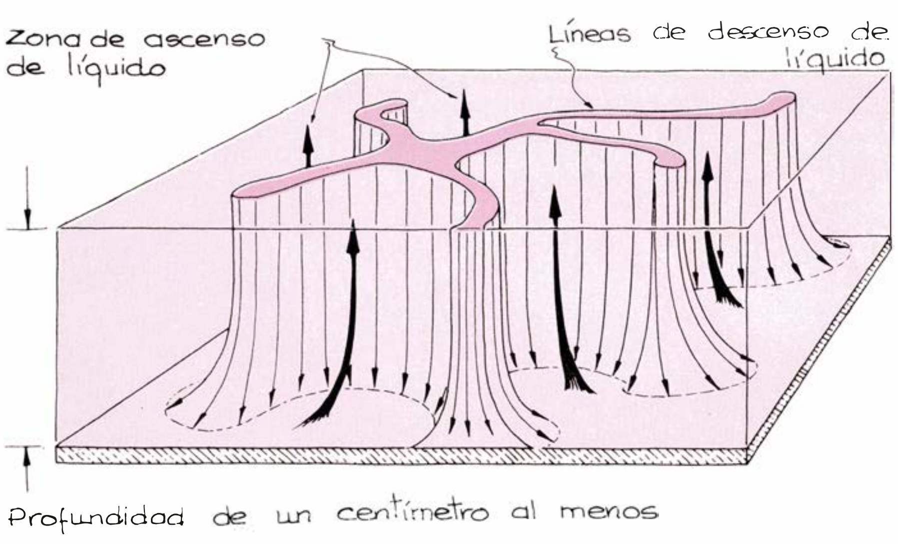
Aquello me dejó perplejo. Ni una sola de las incontables tazas de café normal inacabadas que guardé en los sitios más dispares mostró nunca tales señales. ¿Tiene algo de especial el café turco? Preparé otra infusión y la dejé en un tazón de porcelana del mismo tipo. No apareció nada que reseñar durante el período de evaporación rápida desde la superficie caliente. Pero al tornar a comprobar la situación, transcurridas algunas horas, comencé a notar que se iba recreando el mismo dibujo. Armado de paciencia, de una linterna y de una lupa, aguardé el crecimiento de las



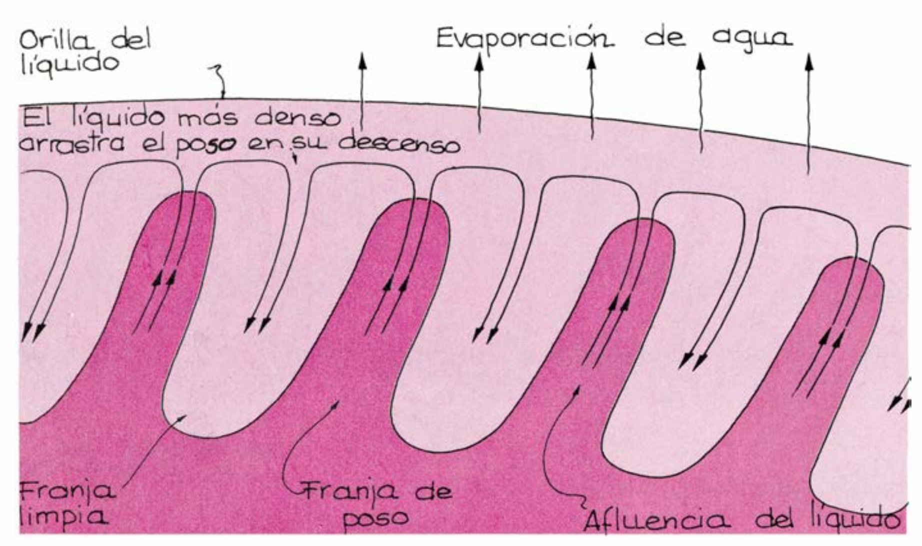
3. Dibujo denticular en el borde de los posos de un café turco



4. Circulación en un líquido somero



5. Circulación en un líquido en evaporación



6. Creación de un dibujo denticular en el poso de un café por efecto de la circulación del líquido

bandas, que no apareció. Me pregunté entonces si aquellos dibujos guardarían alguna relación con el llanto del vino fuerte. Pero no, el líquido mostraba poco movimiento por los costados del tazón.

Acaso se haya escrito ya acerca de este dibujo, pero yo no he encontrado referencia alguna. Para formarse, necesita un sedimento como los residuos del café turco, es decir, con azúcar. Preparé dos tazones de café, uno con azúcar y otro amargo. A la mañana siguiente, el que contenía azúcar presentaba un fino dibujo, no así el otro.

También hace falta la evaporación. Lo que comprobé poniendo un tazón de café en un horno tibio: el dibujo apareció en seguida. Entonces lo borré, arremolinando suavemente el líquido; tapé el recipiente con un trozo de plástico para envolver alimentos. Pasado un rato proyecté la luz de una linterna a través del plástico: allá estaba el dibujo. Volví a remover el tazón y a esperar: no hubo más dibujos.

Según parece, la figura se generó la primera vez porque el agua podía evaporarse en el aire situado encima del café. A partir de entonces, el aire saturado de vapor de agua impidió que prosiguiera la evaporación. La gran concentración de vapor de agua encerrado en el interior del envoltorio de plástico se patentizó cuando abrí la puerta del horno para echar un vistazo; el aire frío procedente de la cocina provocó una condensación rápida por la cara interna del envoltorio.

Acometí el estudio de la formación de aquel dibujo, preparando un buen número de muestras de café turco e introduciéndolas en un vaso picudo y ancho y en una amplia gama de cristales de reloj. La pared vertical del vaso me permitiría examinar la sedimentación de los granos de café valiéndome de una linterna potente. Nada interesante observé en el vaso; de los cristales de reloj nada esperaba, salvo el dibujo usual. Para mi sorpresa, ninguna de las dosis que puse en esos cristales desarrolló un dibujo. Utilicé tapas de plástico de la misma forma que los cristales de reloj, pero tampoco apareció nada. Me sentí defraudado.

De vuelta a los tazones de porcelana, comencé a buscar alguna circulación organizada junto al borde del líquido añadiendo algún tipo de trazador. En uno de esos ensayos inyecté una pequeña cantidad de colorante de cocina, introduciendo la aguja de una jeringa hipodérmica por debajo mismo del nivel del líquido. En otra, rocié la superficie de polvos de licopodio. No salía nada. Pero, tras dejar el tazón a la temperatura ambiente toda la noche, apareció el dibujo.

Ensayé con otros ingredientes. Ni las hojas de té, ni los granos de arena dieron resultado alguno. Diríase que el dibujo requiere, para formarse, que se deposite en el fondo un sedimento fino; las hojas de té y la arena son demasiado gruesas.

En un tazón lleno de la mezcla habitual para café turco, raspé el poso de uno de los costados; esperé el dibujo. Que no tardó mucho, aunque no en el mismo sitio que yo había limpiado. Esto me pareció un dato útil para interpretar la naturaleza del dibujo. Evidentemente, el sedimento había de encontrarse junto a la orilla del líquido. Lo que sea que origina el dibujo no transporta de manera apreciable el sedimento pared arriba ni hacia la orilla del líquido.

Preparé una mezcla de café turco y ginebra a la que añadí una pequeña cantidad de colorante de cocina rojo, que actuara de trazador. El alcohol lo agregué poco a poco, tras dejar enfriar el café un rato. En la parte alta de la pared surgieron pronto lágrimas, pero no se formaron bandas en el café.

Este ensayo, empero, me proporcionó una segunda pista sobre el origen de las bandas. Cada vez que una lágrima resbalaba pared abajo y penetraba en la bebida, abría una senda en el poso, inmediatamente debajo del punto por el que había entrado en el líquido. De ese modo las gotas no tardaron en producir una distribución de bandas semejante a las que había observado con sólo café. Ahora bien, el espaciado era unas diez veces más ancho y su aspecto

Borde del tazón
Orilla del líquido
Película superficial de grasa y leche
Descenso de líquido
Poso de café

7. Formación de un dibujo en una película superficial

variaba mucho, pues los puntos por donde las gotas entraban en el líquido cambiaban.

Quizá sea que, en un café turco normal, se organice un sistema de corrientes que genere esas bandas en el sedimento. En un líquido en evaporación natural, tal sistema puede venir inducido por dos mecanismos. (Por evaporación natural se entiende la que tiene lugar sin que la energía necesaria para ella proceda de una fuente calorífica supletoria, como un hornillo.) El líquido podría moverse en virtud de la variación de la tensión superficial, de un lugar a otro de su superficie; o podría moverse porque el situado a mayor altura adquiriera una densidad mayor que el situado más abajo. O sea, cuando se repiten las condiciones que alteran la tensión superficial y la densidad, a la vez que se regenera el líquido, se organiza un sistema de corrientes.

En una taza de café caliente se forman flujos circulatorios. Aquí ocurre que el líquido caliente del fondo asciende hacia la superficie, y se enfría por evaporación tras un corto paseo por encima de la misma. Se hunde luego hacia el fondo siguiendo líneas estrechas y tortuosas. Este ciclo prosigue hasta que el café se enfría y no logra ya mantenerlo. Aunque en el café caliente los flujos se forman y varían sin orden ni concierto, en determinadas circunstancias y en ciertos líquidos, adquieren unas formas ordenadas y hasta bellas.

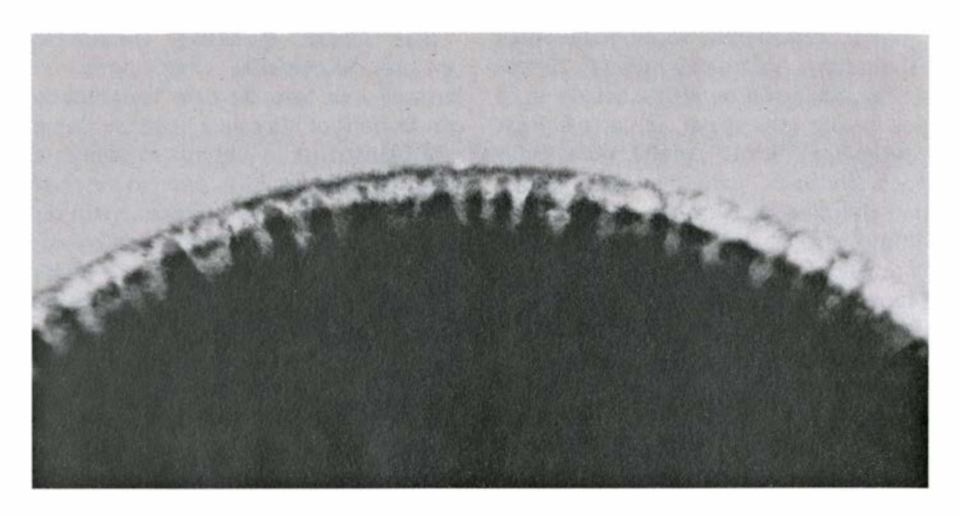
En los líquidos, la evaporación natural origina flujos circulatorios porque el enfriamiento consiguiente acrecienta su tensión superficial y su densidad. El incremento de tensión superficial atrae entonces líquido nuevo, o bien el líquido más denso se hunde y es reemplazado por líquido nuevo. No es tarea fácil determinar cuál de estos mecanismos responde de un sistema circulatorio.

Según las investigaciones de J. C. Berg y Michael Boudart, de la Universidad de California en Berkeley, y Andreas Acrivos, de la Universidad de Stanford, publicadas en 1966, ningún mecanismo de esos actúa si no es con suficiente profundidad del líquido. Para el agua, la profundidad necesaria se cifra en un centímetro. Menos honda, no presenta ya sistemas circulatorios; a mayor profundidad pueden observarse los grandes flujos circulatorios que se organizan en el café caliente.

Otros líquidos estudiados por Berg, Boudart y Acrivos poseían sistemas circulatorios aun cuando fueran muy poco profundos. Sometieron a observación cada líquido, a la vez que aumentaban su profundidad. Vieron que en todos ellos, excluida el agua, la circulación aparecía a unos dos milímetros de profundidad. Los sistemas son "elementos circulatorios bidimensionales que recuerdan a los gusanos". Conforme la profundidad va dilatándose hasta un centímetro, los elementos aumentan de anchura y las líneas de líquido descendente se hacen más perceptibles. Para la profundidad de un centímetro, los elementos se parecen a los del café caliente; entonces, las zonas por donde el líquido sube hasta la superficie se tornan confusas.

¿Por qué se comporta el agua de manera tan peculiar? Porque pequeñísimas cantidades de contaminantes procedentes del aire, del recipiente y del propio experimentador extienden una capa monomolecular (o sea, una capa del grueso de una molécula) por encima de la superficie, impidiendo toda circulación producida por variaciones en la tensión superficial. Así, sólo puede desarrollarse la circulación inducida por las variaciones de densidad. Al parecer, una capa monomolecular de contaminadores estabiliza una profundidad de agua inferior a un centímetro.

Este descubrimiento me defraudó, pues implicaba la negación de flujo junto a la orilla poco profunda de un café turco en evaporación. Pese a ello, el poso de café revelaba una distribución tan regular que se hubiera dicho abierta a mano. Cierto que el café no era agua cristalina: contenía buenas cantidades de azúcar y materias grasas y había sido expuesto al aire durante horas. Su superficie estaría por supuesto cubierta de contaminantes en una capa de un grueso de una molécula por lo menos; en algunos puntos, hasta pude ver minúsculos charquitos aceitosos.



8. Dibujo denticular en un poso de café visto a través de una cámara fotográfica

Al final, conseguí que todas las pistas encajaran. Las bandas necesitan de la evaporación, pues la contaminación impide que se formen por sólo variaciones en la tensión superficial. El dibujo se crea en el sedimento fino situado inmediatamente debajo del borde del líquido. Si este poso se encuentra excesivamente hundido con respecto al borde, nos quedamos sin dibujo. Este se forma únicamente en superficies de pendientes medias; nunca en la pared vertical de un vaso de laboratorio, ni en la suave inclinación de un cristal de reloj.

La contaminación de la superficie del café obstruye la evaporación natural del agua del tazón, pero quizá no pueda reducirla en la misma cuantía en los bordes del líquido. Cuando se evapora parte del agua de un área de líquido pegada a la orilla, el líquido restante queda más denso, pues crecen entonces las concentraciones de azúcar y materias grasas. Así, esa porción se hunde y, en su descenso, abre un surco en el poso. Mientras, otra porción de líquido emerge para sustituir a la anterior. Por depender de la evaporación, la circulación suele ser muy lenta. Parte de la corriente puede estar dirigida hacia la orilla a lo largo de un surco. Y, si la superficie no se halla estabilizada por la contaminación, se desarrollará parte de la corriente a lo largo de la superficie.

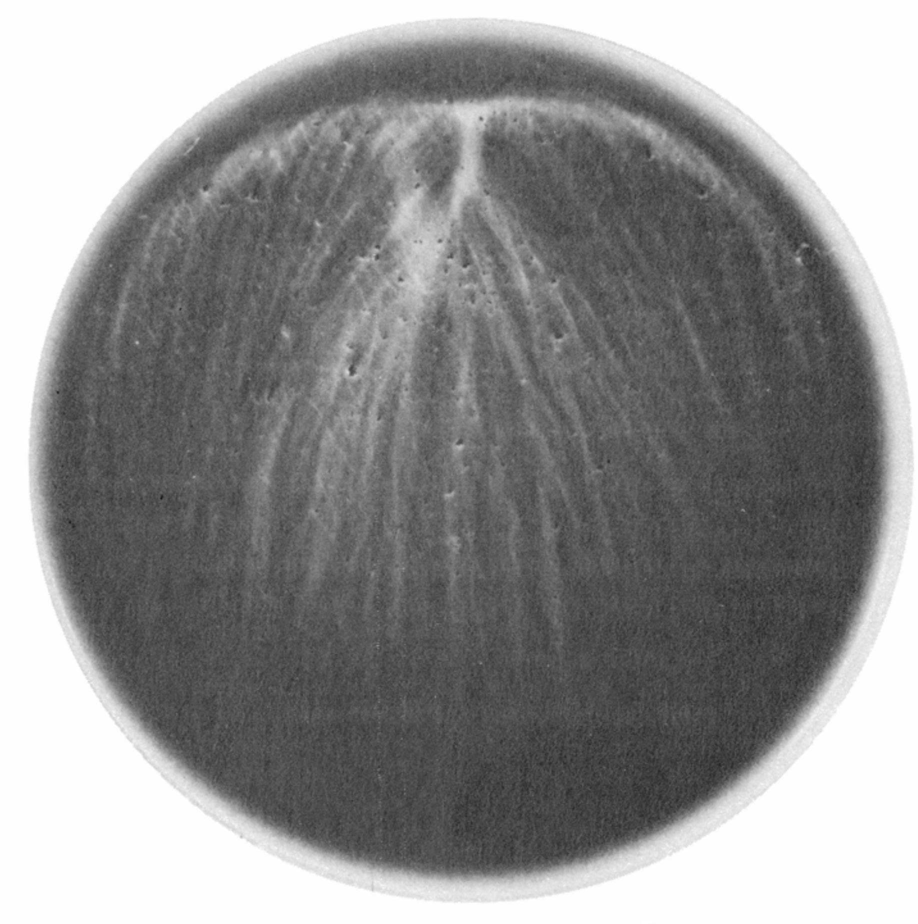
A medida que continúa la evaporación, se va expulsando poso de las bandas limpias. Parte de las bandas con sedimento intermedias pueden alargarse hacia el borde, merced a la suave circulación; pero esta corriente difusa no transporta lejos el sedimento. El azúcar refuerza el efecto, ya que contribuye a hacer más denso el líquido que deja la evaporación junto al borde. El dibujo

aparece únicamente sobre pendientes moderadas. Ante una pendiente abrupta, la circulación no abrirá surcos en el poso; ante otra suave, la capa líquida contigua al borde resulta demasiado poco profunda para que se organice una circulación. Supongo que, en este último caso, la capa de contaminantes se encuentra excesivamente cerca del sedimento y no admite corriente estabilizada alguna. Además, el descenso del líquido denso desde la orilla puede ser demasiado gradual para que se forme el dibujo.

Vayamos con un postrer experimento: agregué una cucharadita de leche a un café turco normal. La materia grasa de la bebida y la de la leche formaron una película sobre la superficie. A la vez que en el sedimento de la orilla se generaba una distribución en bandas, aquella película dibujaba una figura similar; la película suprayacente sobre las bandas de sedimento se extendía hasta el borde del líquido. Pero no había película en las zonas de la superficie situadas encima de las bandas limpias. Esta distribución parece ajustarse exactamente al sistema circulatorio que yo había previsto para el borde del café en evaporación.

Este análisis podemos cimentarlo con otra observación. Cierta noche no terminé una taza de café instantáneo con leche (bebida que a veces se llama café blanco). A la mañana siguiente la superficie del líquido apareció veteada de un dibujo de rayas blancas. Otro dibujo de rayas radiales claramente definidas se veía en el líquido que había quedado en la cuchara que me había servido para removerlo. No parecía importar la profundidad del líquido, que era del orden de un centímetro en la taza y sólo de dos o tres milímetros en la cuchara.

Para estudiar esos dibujos, preparé otro café blanco. Lo distribuí entre varios cristales de reloj y una cuchara metálica. Espolvoreé uno de los cristales con polvos de licopodio. De vez en cuando, durante unas 10 horas, examiné las muestras, en especial junto a la orilla, para lo cual empleé una linterna y una lupa. Transcurridas varias horas de evaporación, aparecieron extensos dibujos a rayas blancas, pero no pude detectar movimiento organizado alguno en los polvos de licopodio. En uno de los cristales, lo allí dibujado representaba las venas de una hoja de árbol. En otro, un peine de líneas paralelas cruzaba toda la superficie de parte a parte. Uno de ellos presentaba algo parecido a una intumescencia, pues las rayas blancas se extendían hacia fuera a partir de un solo punto. Si alteraba, levemente y con sumo cuidado, alguno de los dibujos con la punta de la cuchara, se restablecía al cabo de una hora más o menos.



9. Aspecto de una circulación organizada en el café con leche

Junto a la orilla del líquido de uno de los cristales aparecieron dibujos a escala fina. Las líneas de leche seca, del grueso de un cabello, se disponían perpendiculares al borde. En el café poco profundo contenido en la cuchara se generó un conjunto de dibujos a pequeña escala del mismo tipo, en toda la orilla del líquido, hasta que la evaporación redujo la profundidad hasta menos de un milímetro. A veces las líneas radiales aparecían más destacadas en la cuchara, y más espaciadas. Evidentemente, el café no era de suyo necesario, pero me facilitaba la observación. En uno de los cristales, delgadas capas de leche presentaban el mismo tipo de dibujos a pequeña escala en toda la orilla del líquido.

Mi opinión es que ambos tipos de dibujos ponen de manifiesto los sistemas circulatorios que se organizan en el líquido en evaporación. Las mayores figuras que aparecen en las tazas de café se asemejan a los elementos vermiformes. Cuando el líquido fluye a través de la superficie para descender a continuación, en las líneas de descenso se reúnen partículas de leche, que se solidifican en ellas y señalan las trayectorias de descenso del café. Cabe la posibilidad de que favorezcan la estabilización de la ubicación de los elementos de circulación; si así no fuera, éstos no serían más estables que los del café caliente. Dichos elementos parecen acoplados mecánicamente a la suave circulación de aire que barre la superficie del líquido. Cuando un cuenco de café se expone al aire frío procedente de una ventana abierta, se generan los mismos dibujos de leche.

Los dibujos a pequeña escala adosados a la orilla se parecen a los creados en los sedimentos de café; acaso se deban al mismo sistema circulatorio. Tales líneas de leche, una vez asentadas, podrían estabilizar la circulación en todo el contorno de la orilla. Mientras el agua sigue evaporándose del líquido, las líneas blancas se solidifican en el receptáculo. Cuando el café blanco contenido en un cristal de reloj se ha evaporado por completo, podemos colocar el cristal a la luz solar y contemplar un bello dibujo de líneas radiales.

Libros

Medicina hipocrática, estado sólido, mecanicismo cartesiano y oceanografía

Pedro Laín Entralgo, M. Ortuño, Javier Echeverría y Rosa Martínez

LOS ORÍGENES HELÉNICOS DE LA MEDICINA OCCIDENTAL, por José Alsina. Guadarrama, Punto Omega. Barcelona, Editorial Labor, S. A., 1982. Desde que Littré publicó su todavía indispensable edición del *Corpus Hippocraticum*, la filología helénica se ha aplicado con creciente empeño a la tarea de entender la medicina antigua conforme a lo que ella realmente fue; por tanto, según lo que los textos en que se expresa, estudiados con el rigor lingüístico e histórico que esa filología exige, por sí mismos deben decir al lector. Corregida la mitificación de que durante siglos y siglos había sido objeto, la medicina de la Antigüedad clásica vino a ser un componente esencial de la cultura antigua, junto a Homero, los líricos y los trágicos, y por supuesto, ya depurada de veneraciones superlativas y tópicas, la básica fuente del saber médico de Occidente. Entre las *Hippokratische Untersuchungen* de Fredrich (1899) y los actuales estudios de Joly, Jouanna, Grensemann, Flashar y Alsina, toda una pléyade de helenistas ha colaborado en la tarea.

Ahora bien: ese carácter de fuente del saber médico occidental, nunca negado a la obra de los médicos de la Grecia antigua, desde Alcmeón de Crotona y los autores hipocráticos hasta los alejandrinos y Galeno, ha sido visto en nuestro siglo según dos actitudes anímicas en cierta medida contrapuestas: la devota y tradicional, ahora representada por Bourgey y los secuaces del neohipocratismo médico, y la de quienes, lúcida y deportivamente entregados a la antes mencionada tarea de desmitificación, se han complacido subrayando la parte menos venerable de la doctrina y la práctica de los asclepíadas de Cnido y Cos, con el más o menos acusado riesgo de hacer que el bien traído, ineludible recuerdo de lo accesorio llevase a preferir, o al menos a difuminar, lo verdaderamente esencial: la enorme, decisiva importancia que en la historia de la humanidad tuvo la resuelta conversión de la medicina en *tékhnê iatrikê*. Ese sentido veo yo en la vivaz y realista descripción que de la práctica hipocrática ofreció Edelstein, hace ahora medio siglo, y en la ulterior crítica bachelardiana de la terapéutica hipocrática que Joly ha llevado a cabo en *Le niveau de la science hippocratique*.

Con tanta sabiduría como tacto ha sabido moverse Alsina entre ambos escollos. "El contenido del presente libro –nos dice del suyo– es el resultado de varios años de estudio e investigación sobre la medicina griega... En conjunto, el autor ha intentado una aproximación al tema, procurando que fuera accesible al lector medio e informándole sobre la maravillosa gesta de la cultura griega, que creó una medicina racional que libró al enfermo de los ensalmos y los hechiceros y sentó las bases de lo que después sería la medicina de Occidente". Es de estricta justicia reconocer que el profesor Alsina ha logrado plenamente su intento. A lo largo de una serie de muy bien documentados capítulos –"La literatura médica griega", "Hipócrates: constitución de una *tékhnê* médica", "Los orígenes de la lengua médica griega", "La actitud de Occidente ante la medicina griega", "Vesalio, Galeno y el Renacimiento", "La aportación de la España contemporánea al estudio de la medicina antigua"–, tanto el hipocratista de oficio como el lector culto, pasando por los muchos médicos que sin especial dedicación a la historia quieren saber de dónde procede lo que diariamente hacen, podrán conocer con rigor suficiente y claridad suma lo que esa "maravillosa gesta de la cultura griega" fue en su tiempo y ha sido luego para todos los galenos occidentales u occidentalizados.

Muy viva gratitud merece el profesor Alsina de todos los hispanohablantes a quienes de veras importe la elevación del nivel intelectual de nuestros pueblos. Gratitud acrecida por la generosa diligencia con que ha procedido en la reseña de lo que desde hace varios decenios los españoles venimos haciendo en el cultivo de este campo. Porque, dentro de nuestro desigual cultivo de la ciencia, la obra de los helenistas españoles, secundada por los que desde fuera de la filología clásica han secundado su valioso esfuerzo, constituye –lo diré una vez más– un magnífico, confortante oasis. (P. L. E.)

LIGHT SCATTERING IN SOLIDS II: BASIC CONCEPTS AND INSTRUMENTATION, a cargo de M. Cardona y G. Güntherodt. Springer-Verlag; Berlín, Heidelberg y Nueva York, 1982. Colección *Topics in Applied Physics* n.º 50; 251 páginas. Este volumen es el primero de una serie de tres, dedicados al estudio de la dispersión ("scattering") inelástica de la luz. La edición ha sido preparada por M. Cardona y G. Güntherodt; la contribución del primero abarca la mayor parte del libro y constituye la pieza central y unificadora de la serie. Cardona, que en la actualidad realiza su labor investigadora en el Instituto Max Planck de Stuttgart, del que es uno de los directores, puede ser considerado máxima autoridad en el tema. Nacido en el 1934 en Barcelona, realizó sus estudios de licenciatura en su ciudad natal, para más tarde trasladarse a la Universidad de Harvard, en donde obtuvo el título de doctor. A continuación pasó a la de Brown, y allí desarrolló gran parte de su actividad científica antes de trasladarse al Instituto Max Planck.

La dispersión ("scattering") de la luz por sólidos es una de las técnicas actuales mejor apreciadas para el estudio y caracterización de gran cantidad de materiales, así como de sus superficies y de los agregados depositados en ellas. Dicha técnica consiste en iluminar el material objeto de estudio con luz coherente de una determinada frecuencia. Después de interactuar con el sólido, la luz se recoge y se mide su intensidad en función del cambio de frecuencias producido por dicha interacción. El cambio en la frecuencia luminosa da una valiosa información sobre las llamadas excitaciones elementales del sólido. Estas corresponden a los procesos que se verifican en un sólido cuando se le somete a una perturbación externa. El conocimiento de tales excitaciones reviste gran interés, ya que son las responsables de la mayor parte de las propiedades del sólido: ópticas, eléctricas, magnéticas, térmicas o mecánicas. El cambio en la frecuencia de la luz en el

sólido está producido por la emisión o absorción de una o varias de estas excitaciones elementales; su conocimiento constituye, pues, una medida directa de las energías de estas excitaciones.

En 1975 apareció ya un primer libro sobre la dispersión inelástica de la luz en sólidos. Estaba también al cuidado de M. Cardona y estudiaba fundamentalmente esa técnica en materiales semiconductores. El rápido avance de la misma en los últimos años provocó la necesidad de un nuevo y más extenso tratamiento, que quedará plasmado en estos tres volúmenes, el primero de los cuales estamos reseñando. Como indica el subtítulo, está dedicado a los conceptos básicos y a la instrumentación, dejando el estudio de los diversos materiales específicos para los dos volúmenes restantes. Una de las causas principales de los espectaculares avances logrados en los últimos años por esas técnicas espectroscópicas ha sido el desarrollo y la posibilidad de obtener comercialmente potentes láseres de longitud de onda variable. La frecuencia de estos láseres puede sintonizarse a alguna de las transiciones electrónicas importantes del material, lo que produce una intensidad de dispersión mucho mayor que en condiciones normales, debido al carácter resonante del proceso. Esto ha permitido la extensión de las técnicas espectroscópicas de dispersión a materiales muy diversos: metales, semiconductores dopados, superconductores y compuestos de valencia intermedia.

Una característica esencial de la obra es el equilibrio entre la sencillez y el rigor, difícil de conseguir a la hora de abordar un tema de los llamados de "frontera". Fundamentalmente pensada para físicos del estado sólido, también podrá resultar de interés para gran cantidad de científicos que trabajan en algunas de las numerosas especialidades en que estas técnicas espectroscópicas se aplican. La lectura es fluida, si tenemos en cuenta el alto nivel de la materia objeto del libro. El tratamiento es autoconsistente, dentro de las drásticas limitaciones impuestas por la gran cantidad de resultados contenidos en un espacio tan pequeño. Su comprensión cabal exige, como mínimo, una formación equivalente a un primer ciclo de ciencias físicas; resulta bastante conveniente, en determinadas partes, saber algo del tema.

La obra se divide en cuatro capítulos. El primero de ellos, de introducción, es un análisis general de los tres volúmenes de la serie, y un repaso de los más importantes avances realizados en los últimos años.

El segundo capítulo, escrito por el profesor Cardona, constituye el núcleo de este volumen. En él se examinan los fenómenos de resonancia en la dispersión de la luz, tanto en los materiales cristalinos como en los amorfos, y principalmente cuando se produce por fonones o por excitaciones electrónicas. Estamos asistiendo a una proliferación de resultados experimentales medidos en unidades absolutas, lo que a su vez ha inducido a la obtención de expresiones teóricas, también en unidades absolutas. A dichos resultados les falta un tramado unificador. En este capítulo se unifican los diversos tratamientos teóricos, obteniendo todas las expresiones en unidades absolutas. En su primera parte, acomete una exposición clásica de la dispersión inelástica de la luz por moléculas, líquidos y sólidos, aunque algunas veces introduce razonamientos cuánticos. Usa ampliamente la aproximación cuasiestática, en la que se asocia la dispersión inelástica a las fluctuaciones de la polarizabilidad óptica del medio. Se analiza la dispersión por fonones, tanto Raman (fonones ópticos) como Brillouin (fonones acústicos). Estudia la dispersión de Raman en materiales amorfos, campo que está experimentando un crecimiento espectacular. El desorden inherente en ellos rompe las reglas de selección en el momento cristalino, por lo que todos los modos de vibración están permitidos, y el espectro de primer orden es aproximadamente proporcional a la densidad de estos modos. Se concluye con una descripción de los distintos métodos usados para la determinación de resultados experimentales en unidades absolutas.

En la segunda parte de este capítulo analiza la teoría cuántica de la dispersión inelástica. La exposición se mantiene a un nivel comprensible, dejando un análisis más formal para el siguiente volumen. Siempre que puede, trata de establecer contacto con la teoría de la polarizabilidad, descrita en la primera parte. Insiste en la unificación de las diversas teorías y de los diferentes fenómenos. Termina con la presentación de gran número de resultados experimentales, que se refieren fundamentalmente al germanio, a los semiconductores con estructura cristalina del tipo de la blenda de zinc y el Cu_2O. A partir de estos datos, y con un conocimiento de la estructura de bandas y de la dinámica de redes del material, podemos extraer información acerca de la interacción electrón-fotón.

El tercer capítulo, escrito por Chang y Long, trata sobre la nueva técnica de instrumentación llamada detección óptica multicanal. Resulta especialmente adecuada para medidas de resolución-temporal y de resolución-espacial. Sus autores se dirigen al no especialista. Se analizan tanto los intensificadores de imagen y detectores como los espectrógrafos de muchos-pasos, para acabar mostrando diversos sistemas de computación adecuados al caso.

En el último capítulo, Vogt se ocupa de diversos efectos ópticos no-lineales. Comienza con un estudio de las susceptibilidades no-lineales. Las principales técnicas no-lineales estudiadas son la dispersión de Raman coherente –en donde la señal de entrada está producida por la interacción del rayo láser original y los modos activos Raman– y la espectroscopía hiper-Raman, en donde están involucrados procesos de tres fotones. Al igual que los otros capítulos de la obra, finaliza con una muy extensa y cuidada bibliografía, a tono con el carácter general del estudio. (M. O.)

TRATADO DEL HOMBRE, por R. Descartes. Edición y traducción de Guillermo Quintás. Editora Nacional, Clásicos para una biblioteca contemporánea, n.º 1, Madrid 1980, 157 páginas. Descartes es uno de los grandes filósofos, omnipresente en los manuales de historia del pensamiento, pero su obra científica resulta muy poco conocida. Y sin embargo, su influencia en el siglo XVII, es decir, en plena consolidación de la ciencia moderna, fue profundísima. Su crítica radical a la física aristotélica y la formulación clara de un nuevo modelo explicativo del movimiento y de la vida son los referentes que, bajo la denominación de *mecanicismo*, sentaron las bases de múltiples investigaciones que mantienen su valor aún hoy en día. La reciente edición del *Tratado del hombre* (*De l'homme*, en francés), en una pulcra y cuidadísima edición a cargo de Guillermo Quintás, pone al alcance del lector en castellano una obra cuyo éxito fue fulgurante tras su aparición, como lo prueban las cuatro ediciones que se sucedieron entre 1662 y 1667. Se trata de una obra fundamental para la historia de la ciencia, y más en concreto de la medicina y de la fisiología, aunque también la psicología ha de tenerla como una de sus antecesoras.

El *Tratado del hombre* constituía el capítulo XVIII de una gran obra que Descartes redactó en 1633: el *Mundo*. La heterodoxia de sus tesis, que contradecían directamente la ciencia

aristotélico-escolástica vigente a la sazón, y la reciente condena de Galileo por la Inquisición, le disuadieron de publicarla e incluso de terminar su redacción. Su gran tratado cosmológico quedó inédito e incompleto: el *Mundo* se acaba en el capítulo XV, ignorándose si los capítulos XVI y XVII llegaron a ser escritos o si se perdieron en el traslado de los papeles de Descartes desde Estocolmo a Francia: traslado azaroso, como se sabe, pues el barco que los transportaba zozobró en el Sena, recuperándose algunos baúles por pura casualidad. Con buen criterio, que se mantiene en la traducción al castellano, el *Tratado del hombre* fue publicado como obra separada: su unidad interna es grande, tanto por el tema como por el tratamiento, si bien es cierto que su comprensión cabal requiere también la lectura del *Mundo*, pudiendo verse favorecida por la consulta de la *Dióptrica* (recientemente traducida por Alfaguara) e incluso del *Tratado de las Pasiones*.

En esta fase de su vida (1630-35) Descartes se había consagrado definitivamente al pensamiento, pero su filosofía no estaba definitivamente consolidada (*Discurso del Método, Meditaciones Metafísicas*, etc.). Es la época de los escritos científicos y de la experimentación (física, óptica, biología), en la que se configuran y concretan las tesis mecanicistas. Su interés es muy grande, y no sólo para entender la posterior evolución del cartesianismo, sino también para la historia de la ciencia en el siglo XVII.

Como señala en la *Introducción* Guillermo Quintás, "la hipótesis del hombre-máquina, tan firmemente mantenida en esta obra, viene a introducir un nuevo paradigma del ser en movimiento y a distinguir el principio del movimiento corporal del principio del pensamiento" (p. 38). Frente al acto y la potencia, Descartes va a explicar la *physis* partiendo del atomismo y recurriendo a categorías explicativas de los fenómenos físicos que se resumen en el estudio de las posiciones y movimientos de partículas materiales. Los principios animados y las formas sustanciales que daban cuenta de la diversificación funcional de los órganos del cuerpo humano van a quedar desterrados de la ciencia, poniendo en su lugar un principio único de explicación, plenamente materialista y mecánico. Descartes fue consciente de la importancia histórica de sus tesis, que suponían un vuelco del saber establecido, y por eso mismo las presentó como ficciones, más que como teorías sobre lo real. El *Tratado del hombre* construye un hombre imaginario que, eso sí, resulta ser perfectamente análogo al hombre real tal y como éste puede ser observado. La importancia que Descartes concede a la observación y a la adecuación de las teorías científicas a datos observables es muy grande (es sabido que durante esta época trabajó empíricamente sobre cadáveres de hombres y animales), tal y como Quintás lo recalca en su *Introducción*, combatiendo con ello interpretaciones del cartesianismo que sólo constatan un apriorismo introspectivo.

A partir de un modelo maquínico para el cuerpo humano, Descartes explica con todo lujo de detalles funciones corporales tan distintas como la circulación de la sangre (uno de los primeros en mantener tal tesis), el latido del corazón, la alimentación, la digestión, el crecimiento, la respiración, la percepción (durante la vigilia y en el sueño), los sentidos internos (hambre, sed, alegría, dolor) y, por supuesto, la sensibilidad y la motilidad externas. Su proyecto inicial no sólo se circunscribía al cuerpo, sino que también pretendía teorizar sobre el alma y sobre la unión alma-cuerpo, pero por los motivos antes citados acabó interrumpiendo la redacción sin llegar a estos dos capítulos. El *Tratado del hombre*, por lo tanto, supone una teoría del cuerpo más que del hombre, y en él se desarrollan hipótesis muy interesantes (Leuwenkoek descubriría el microscopio pocos años después, obligando a una reformulación) sobre los músculos, el cerebro, los nervios o la sangre, aparte de las bien conocidas hipótesis de los *espíritus animales* y de la *glándula pineal* (sede del alma), que tanto le fueron criticadas posteriormente.

El mayor interés del libro, desde el punto de vista de la historia de la ciencia, no está sólo en estos detalles, sino que radica en la formulación de un auténtico *paradigma* que va a dar lugar en el siglo XVII a una importante *revolución científica*. Como el propio Descartes dice respecto a las funciones corporales, "deseo que sean consideradas sólo como consecuencia natural de la disposición de los órganos de esta máquina; sucede lo mismo, ni más ni menos, que con los movimientos de un reloj de pared u otro autómata, pues todo acontece en virtud de la disposición de sus contrapesos y de sus ruedas. Por ello, no debemos concebir en esta máquina alma vegetativa o sensitiva alguna, ni otro principio de movimiento y de vida. Todo puede ser explicado en virtud de su sangre y de los espíritus de la misma agitados por el calor del fuego que arde continuamente en su corazón y cuya naturaleza no difiere de la de otros fuegos que se registran en los cuerpos inanimados" (p. 117). Descartes ofrece continuamente, para ilustrar sus tesis, comparaciones de gran interés entre el cuerpo y algunos ingenios técnicos de su época.

La edición presentada por la Editora Nacional es muy correcta, pues parte de la de Clerselier de 1664, hecha sobre el original de Descartes, e incluye las referencias a la edición crítica de Ch. Adam y A. Tannery de las *Obras Completas* de Descartes, lo cual la hace muy utilizable por un público universitario. Asimismo incluye las láminas de la primera edición (dos de ellas del propio Descartes). Lástima que se haya mantenido la costumbre antigua, poniéndolas al final del libro, lo cual hace más incómoda su consulta, en lugar de intercalarlas entre el texto, como sucede en la edición de Alquié, destinada a un público amplio.

La introducción de Guillermo Quintás es de gran interés y perfectamente accesible para el lector culto. Sus notas aportan a veces consideraciones filosóficas importantes (como en la nota 18), pero sin hacer pesado el texto, pues la medida es justa y la oportunidad de su inclusión indiscutible. Asimismo se proporcionan las conexiones con otros pasajes de la obra de Descartes, incluida la correspondencia; y a veces de manera exhaustiva, por lo que cabe afirmar que nos encontramos con una edición muy útil, que apenas cabe rectificar y que será, a mi entender, la edición definitiva en castellano del *Tratado del hombre*.

Hay algunas mejoras que se podrían introducir en la traducción en ediciones posteriores, como en la página 50, donde puede inducirse una interpretación inadecuada de la expresión cartesiana al traducir "como para que no tengáis motivo para pensar que pudiera ser aventajada por otra", de lo cual parece inferirse la posibilidad de construir una máquina más perfecta que el cuerpo humano, mientras que Descartes se refiere a que cabe una descripción mecanicista del cuerpo aún más adecuada que la suya. Asimismo la elección de un estilo impersonal en castellano (Descartes en francés se dirige a un lector concreto: *vous*) puede ser una opción válida, pero de hecho no se mantiene sistemáticamente (p. 56, 64, 65 y 67, por ejemplo). De todos modos, se trata

de defectos pequeños y aislados, puramente de detalle. La traducción es muy correcta, además de elegante estilísticamente. (J. E.)

INTRODUCTION TO OCEANOGRAPHY, por David A. Ross. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs; N. J. 1982. El mundo de la oceanografía despierta, en los últimos años, una atracción creciente, tanto en la comunidad científica como en el público en general. No en vano el océano ha constituido, históricamente, una de las principales vías de comunicación, de transvase de culturas, de poderío e influencia, y en tiempos más recientes viene siendo la clave para entender problemas tan importantes como el origen de la tierra, la adaptación y evolución de los organismos o el clima de nuestro planeta. Además, su importancia estratégica y como fuente de recursos ha ido siempre en aumento. En palabras de Ross "el océano es una de las últimas fronteras asequibles a la raza humana".

David A. Ross es especialista en geología marina –u oceanografía geológica– y forma parte de uno de los institutos oceanográficos más laboriosos y prestigiados del mundo, el de Woods Hole (Massachusets, Estados Unidos). Autor de varios libros y artículos científicos, tanto sobre geología del fondo marino como sobre aprovechamiento del océano –temas ambos muy relacionados–, ha publicado, en 1982, la tercera edición de su libro *Introduction to Oceanography*, que ha visto aumentado y actualizado su contenido respecto de las dos anteriores –de 1970 y 1977, respectivamente– con materiales recientes y muy oportunos, que responden a los últimos hallazgos y preocupaciones de la ciencia oceanográfica, como el clima, las costas, los nuevos usos del océano y la expansión de los fondos marinos. El libro va dirigido a estudiantes y, en general, a un público culto, aunque no necesariamente científico. Está escrito de un modo muy comprensible, de fácil y agradable lectura.

Ross define la oceanografía como "la aplicación de toda la ciencia a los fenómenos del océano". No se trata de una ciencia única, sino combinación de varias. Para su estudio práctico se ha venido dividiendo tradicionalmente en cuatro ramas: oceanografía química, biológica, física y geológica, pero hay que tener presente que los fenómenos que contemplan las distintas ramas están relacionados entre sí, a veces muy íntimamente. En los últimos años se ha incorporado la ingeniería oceanográfica y el derecho del mar.

El libro consta de quince capítulos. En el primero se ocupa de la ciencia de la oceanografía, las características generales del océano y la oceanografía como carrera o profesión. El segundo nos relata la historia de la oceanografía de un modo algo superficial, aunque ameno y, en lo referente al pasado inmediato, con un claro sesgo hacia las contribuciones de su país y, más en general, del mundo anglosajón. Nos introduce, en el tercero, en la instrumentación y técnicas básicas, acompañadas de un interesante material fotográfico.

Los tres capítulos siguientes –4, 5 y 6– son de carácter geológico: origen de la tierra y del océano, geología y geofísica marinas y, por último, expansión de los fondos marinos y tectónica de placas. El avance reciente de los conocimientos sobre planetología, gracias, por una parte, a los programas espaciales y, por otra, a la exploración del fondo marino, que incluyen perforaciones y observación directa del mismo, se nos ofrece en riguroso resumen. Dicho progreso ha permitido estudiar los cambios de clima a lo largo de las eras geológicas, explorar las distintas zonas y accidentes de relieve del fondo marino, encontrar recursos minerales.

Tras describir las características de las cuencas océanicas, con sus distintas regiones, los sedimentos y las rocas, se detiene en la expansión de los fondos marinos. La teoría de la deriva continental y su historia, expuestas con gran detalle y claridad, se ven asistidas por excelentes diagramas. La idea básica es que la parte superior de la superficie terrestre se compone de una serie de placas que se encuentran en movimiento relativo entre sí. A lo largo de los fosos submarinos, el fondo se expande lentamente y nueva corteza, compuesta de materiales volcánicos que van aflorando y extendiéndose, se va añadiendo al fondo. En otras zonas las placas se acercan, empujándose mutuamente, lo que da lugar, en el tiempo, a lomas o crestas submarinas, o a cadenas montañosas. Quedan por resolver varias cuestiones: el mecanismo desencadenante de la expansión del fondo, la frecuencia o regularidad con que se mueven las placas, y otras.

Pasemos a la oceanografía química. El autor resalta dos aspectos importantes: la presencia creciente de contaminantes y tóxicos en el mar y el efecto de los organismos y sus procesos metabólicos en la composición del agua marina. Este último fenómeno da origen al ciclo bioquímico. Los factores que determinan la composición del agua marina son, entre otros, el intercambio con la atmósfera y con el fondo, la solubilidad de los compuestos y los procesos químicos y biológicos.

Al abordar la oceanografía biológica, estudia las características del agua del mar como medio para la vida, las divisiones del medio marino, los tipos de vida en el mar y los grupos taxonómicos de plantas y animales que lo habitan. Dedica un escueto párrafo a las bacterias; se echa de menos una exposición un poco más amplia y rigurosa, habida cuenta de la importancia que las bacterias marinas vienen adquiriendo en la investigación. Su pequeña biomasa no coarta las numerosas funciones que desarrollan, algunas de las cuales determinan características fundamentales del océano; citemos, por ejemplo, su labor desnitrificadora, bajo las productivas zonas de afloramiento.

La parte correspondiente a los animales, que se completa con unas bellas fotografías en color, examina los requerimientos y adaptaciones de los organismos y el ciclo del alimento. Hubiera preferido hallar este último punto beneficiado de un poco más de carga ecológica, con aspectos dinámicos, incluso en aras de los descriptivos. Algunas nociones sobre distribuciones del plancton, migraciones y un mayor énfasis en las interrelaciones entre los organismos y la composición del agua hubieran resultado muy adecuadas.

Con el capítulo noveno llegamos a la oceanografía física; presta la atención que merecen las interrelaciones entre la atmósfera y el océano: características hidrográficas, circulación debida al viento y termohalina, olas, mareas y luz. El capítulo, bien planteado, señala la conveniencia y actualidad de medidas de tipo sinóptico. No se olvida del interés de los anillos de la corriente del Golfo. El clima y el océano (capítulo 10) constituye una secuencia lógica del apartado anterior. Incluye: El Niño, el problema del dióxido de carbono y un estudio del clima en el pasado, con las hipótesis en uso para explicar el principio y el fin de las glaciaciones.

La zona costera –objeto del capítulo 11– tiene una importancia que excede, en mucho, a su extensión relativa, dado que aproximadamente dos tercios de la población humana mundial vive próxima a las costas. El capítulo trata sobre las playas, los estuarios, lagunas, marismas y deltas. ¿Por qué no insistir en el estuario, introducir los diferentes tipos, con sus patrones de circulación y resaltar su importancia como fuente de recursos alimenticios y zona de hábitats protegidos para muchas especies? Se han convertido, además, en receptores

de todo tipo de vertidos y en zonas superpobladas. Constituye un acierto el breve repaso a los problemas costeros, entre ellos la erosión de las dunas, el relleno de estuarios y marismas que, en parte, derivan de la propia complejidad y fragilidad de estos sistemas.

De la riqueza de los océanos destaca los recursos minerales, clasificándolos según se encuentren en los márgenes continentales, deriven de la expansión de los fondos marinos o pertenezcan al mar profundo. Algunos de los recursos más importantes, como los hidrocarburos, están en explotación, pero hay otros no explotados y que se presume encierren gran interés económico, como son los fangos metalíferos del Mar Rojo y los nódulos de manganeso del fondo del océano.

Menos brillante es la parte dedicada a los recursos biológicos. Quizás en ello tenga que ver la especialización geológica del autor y su escepticismo acerca de la capacidad del mar para alimentar a la humanidad. No hubiera estado de más matizar esa desconfianza recordando la tecnología de "granjas marinas" y cultivos desarrollada hoy en Japón y algunos países de Europa, que resulta bastante prometedora. Los recursos físicos se encuentran, en su mayor parte, sin explotar. Se menciona la energía de las mareas y el transporte marítimo.

La contaminación del mar centra hoy todas las atenciones. El peligro reside no sólo en el tipo de contaminante, sino en la situación de la zona receptora. Los tipos de contaminantes son muy variados: domésticos, agrícolas, industriales. Unos proceden de las costas adyacentes, otros se vierten directamente al mar. Muchas veces –como el petróleo– se derraman por accidente. Además de destruir los organismos, la contaminación altera las propiedades físicas y químicas del agua e introduce sustancias nocivas que se concentran a lo largo de la cadena de alimento. Lo más preocupante del caso es la falta de datos para poder evaluar los cambios.

Mira la obra al futuro, a las posibilidades de utilización del mar. Y el abanico consta aquí de muchas varillas: energía de mareas y olas, afloramientos artificiales, energía de la biomasa marina, obtención de agua dulce, eliminación de residuos radiactivos, cultivo y "pastoreo" de peces y explotación del krill. Sin olvidar la exploración por satélites y la arqueología marina, con los modernos métodos de inmersión, para la recuperación del legado de civilizaciones antiguas. El libro se cierra con un capítulo sobre la ley del mar. (R. M.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

ARMAS INTELIGENTES EN LA GUERRA NAVAL

SHAPING THE GENERAL-PURPOSE NAVY OF THE EIGHTIES: ISSUES FOR FISCAL YEARS 1981-1985. Congressional Budget Office. U.S. Government Printing Office, 1980.

THE FALKLANDS CAMPAIGN: THE LESSONS. Secretary of State for Defence. Her Majesty's Stationery Office, 1982.

VIBRACIONES DEL NUCLEO ATOMICO

NUCLEAR VIBRATIONS. G. F. Bertsch en *Nature*, vol. 280, n.º 5724, páginas 639-644; 23 de agosto de 1979.

GIANT RESONANCES IN NUCLEI. J. Speth y A. van der Woude en *Reports on Progress in Physics*, vol. 44, 3.ª parte, págs. 719-786; 1981.

DAMPING OF NUCLEAR EXCITATIONS. G. F. Bertsch, P. F. Bortingnon y R. A. Broglia en *Reviews of Modern Physics*, vol. 55, n.º 1, págs. 287-314; enero, 1983.

MICROCUERPOS CELULARES

LOCALIZATION OF NINE GLYCOLYTIC ENZYMES IN A MICROBODY-LIKE ORGANELLE IN *TRYPANOSOMA BRUCEI*: THE GLYCOSOME. Fred R. Opperdoes y Piet Borst en *FEBS Letters*, vol. 80, n.º 2, págs. 360-364; agosto, 1977.

THE HYDROGENOSOME. Miklós Müller en *Symposia of the Society for General Microbiology*, vol. 30, páginas 127-142; 1980.

METABOLIC PATHWAYS IN PEROXISOMES AND GLYOXYSOMES. N. Edward Tolbert en *Annual Review of Biochemistry*, vol. 50, págs. 133-157; 1981.

PEROXISOMES AND GLYOXYSOMES. Dirigido por Helmut Kindl y Paul B. Lazarow en *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 386, páginas 1-550; 1982.

AVANCES EN LA PRODUCCION PORCINA

SWINE PRODUCTION IN TEMPERATE AND TROPICAL ENVIRONMENTS. Wilson G. Pond y Jerome H. Maner. W. H. Freeman and Co., 1974.

SWINE PRODUCTION. Jake L. Krider y William E. Carroll. McGraw-Hill Book Company, 1975.

SILENT PARTNERS: FARMERS, THERI ANIMALS AND CONSUMERS. W. G. Pond. Lacuna Books, Interlaken, N.Y., 1978.

NUEVOS MATERIALES INORGANICOS

INORGANIC POLYMERS. N. H. Ray. Academic Press, 1978.

MAKING THE MOST OF MATERIALS: MATERIALS AND ENERGY CONSERVATION IN THE MATERIALS PROCESSING INDUSTRIES. Science Research Council, 1979.

FLEXURAL STRENGTH AND POROSITY OF CEMENTS. J. D. Birchall, A. J. Howard y K. Kendall en *Nature*, volumen 289, n.º 5792, págs. 388-389; 29 de enero de 1981.

FLEXIBLE INORGANIC FILMS AND COATINGS. D. G. H. Ballard y G. R. Rideal en *Journal of Materials Science*, vol. 18, n.º 2, págs. 545-561; febrero, 1983.

METODOS ESTADISTICOS INTENSIVOS POR ORDENADOR

MULTIVARIATE ANALYSIS. K. V. Mardia, J. T. Kent y J. M. Bibby. Academic Press, 1979.

COMPUTERS AND THE THEORY OF STATISTICS: THINKING THE UNTHINKABLE. Bradley Efron en *SIAM Review*, volumen 21, n.º 4, págs. 460-480; octubre, 1979.

BOOTSTRAPPING A REGRESSION EQUATION: SOME EMPIRICAL RESULTS. D. Freedman y S. Peters. Technical Report n.º 10, Departamento de estadística, Universidad de California en Berkeley, 1982.

THE JACKKNIFE, THE BOOTSTRAP AND OTHER RESAMPLING PLANS. Bradley Efron. SIAM Monograph n.º 38, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1982.

THE VARIABILITY OF ACID RAINFALL. B. Eynon and P. Switzer. Technical Report n.º 58, Departamento de estadística, Universidad de Stanford, 1982.

SIMBIOSIS *RHIZOBIUM*-LEGUMINOSA

LA SYMBIOSE *RHIZOBIUM*-LEGUMINEUSES: ROLES RESPECTIFS DES PARTENAIRES. J. Derarié y G. Truchet, en *Physiologie végétale*, vol. 17, n.º 4, páginas 643-667; 1979.

LA FIJACIÓN BIOLÓGICA DE NITRÓGENO. IMPORTANCIA Y PERSPECTIVAS. J. Olivares, E. J. Bedmar y J. Casadesús, en *Anales de Edafología y Agrobiología*, 38, págs. 1457-1466; 1979.

CURRENT PERSPECTIVES IN NITROGEN FIXATION. A. A. Gibson y W. E. Newton. Australian Academy of Sciences, 1981.

ROOT NODULES OF LEGUMES: STRUCTURE AND FUNCTIONS. F. J. Bergersen. John Wiley and Sons; Nueva York, 1982.

BIOLOGICAL NITROGEN FIXATION: FUNDAMENTALS. J. R. Postgate, en *Phil. Trans. R. Soc.* 296; 1982.

MYCORRHIZAS AND THEIR SIGNIFICANCE IN NODULATING N-FIXING PLANTS. J. M. Barea y C. Azcón-Aguilar, en *Advances in Agronomy*. Dirigido por N. C. Brady. Academic Press, vol. 36 (1983) (en prensa).

MUERTE SUBITA DE ORIGEN CARDIACO: UN PROBLEMA TOPOLOGICO

SUDDEN CARDIAC DEATH-1978. Bernard Lown en *Circulation*, vol. 60, n.º 7, págs. 1593-1599; diciembre, 1979.

THE GEOMETRY OF BIOLOGICAL TIME. Arthur T. Winfree. Springer-Verlag, 1980.

COMPUTER SIMULATION OF ARRHYTHMIAS IN A NETWORK OF COUPLED EXCITABLE ELEMENTS. Frans J. L. van Capelle y Dirk Durrer en *Circulation Research*, vol. 47, n.º 3, págs. 454-466; septiembre, 1980.

FIBRILLATION AS A CONSEQUENCE OF PACEMAKER PHASE-RESETTING. A. T. Winfree en *Cardiac Rate and Rhythm*, dirigido por L. N. Bouman y H. J. Jongsma. Martinus Nijhoff, 1982.

TEMAS METAMAGICOS

TWO-PERSON GAME THEORY. Anatol Rapoport. University of Michigan Press, 1966.

THE EVOLUTION OF COOPERATION. Robert Axelrod y William D. Hamilton en *Science*, vol. 212, n.º 4489, págs. 1390-1396; 27 de marzo de 1981.

TALLER Y LABORATORIO

INTERFACIAL PHENOMENA. J. T. Davies y E. K. Rideal. Academic Press, 1963.

NATURAL CONVECTION IN POOLS OF EVAPORATING LIQUIDS. J. C. Berg, M. Boudart y Andreas Acrivos en *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 14, páginas 721-735; 1966.